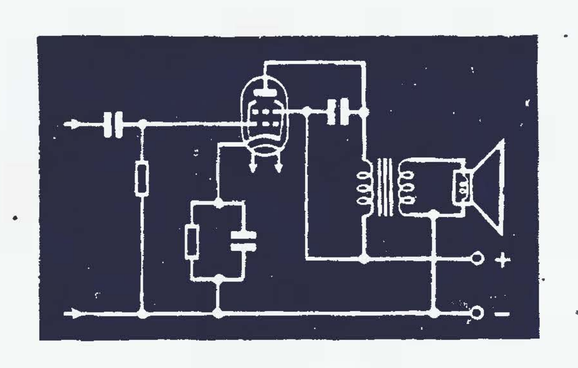
МАССОВАЯ РАДИО-БИБЛИОТЕКА

Е. А. ЛЕВИТИН

ВЫХОДНАЯ СТУПЕНЬ РАДИОПРИЕМНИКА





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ДАННЫЕ ВЫХОДНЫХ ЛАМП

Тип лампы	Накал		Анод		Экранная сетка		Напряжение смещения, *в*	Допустимое рассеяние на аноде, *вт*	Крутизна характеристики, *ма/в*	Внутреннее сопротивление, *ом*	Сопротивление нагрузки, *ом*	Полезная выходная мощность, *вт*
	напряжение, *в*	ток, *а*	напряжение, *в*	ток, *ма*	напряжение, *в*	ток, *ма*						
2П1П	2,4 1,2	0,06 0,12	90	9,5	90	2	—4,5		2,15	100 000	10 000	0,25
6Ф6	6,3	0,7	250	34	250	7	—16,5	10	2,5	78 000	7 000	3
6V6	6,3	0,45	250	45	250	4,5	—12,5	12	4,1	52 000	5 000	4,5
6П3	6,3	0,9	250	72	250	5,5	—14	20,5	6	22 500	2 500	6,5
6В4	6,3	1	250	60	—	—	—45	15	5,25	800	2 500	3,5
30П1М	30	0,3	200 110	50 48	110 110	3 6	—8 —7,5	7	10 9	13 000 30 000	3 000 2 000	4 2

МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА
ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 98

Е. А. ЛЕВИТИН

ВЫХОДНАЯ СТУПЕНЬ РАДИОПРИЕМНИКА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1951 ЛЕНИНГРАД

В брошюре излагаются сведения о показателях, характеризующих работу выходных ступеней радиоприемников, о выборе ламп для них и о способах расчета таких ступеней для правильного и наиболее выгодного использования усилительных свойств ламп.

Приводятся также сведения о наиболее употребительных для этой цели типах ламп.

Брошюра не содержит полного изложения вопроса о расчете всех элементов выходной ступени, в частности расчета выходных трансформаторов. В ней не затрагиваются также вопросы расчета усилителей, лампы которых работают в режиме классов АВ и В. Эти вопросы ввиду их сложности должны явиться самостоятельной темой.

СОДЕРЖАНИЕ

Редактор *И. И. Спижевский* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в набор 11/XII 1950 г. Подписано к печати 23/II 1951 г.
Бумага 84×108[1]/[32]=[7]/[8] бумажных —2,87 п. л., уч.-изд. л. 3,5
Т-01552 Тираж 40 000 экз. Зак. 370

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10

ЧТО ТАКОЕ ВЫХОДНАЯ МОЩНОСТЬ

Под выходной мощностью подразумевается полезная мощность звуковой частоты, выделяющаяся на нагрузке выходной ступени радиоприемника или усилителя низкой частоты.

Понятие «полезная мощность» требует специального разъяснения.

Прежде всего следует различать мощность электрическую и мощность акустическую.

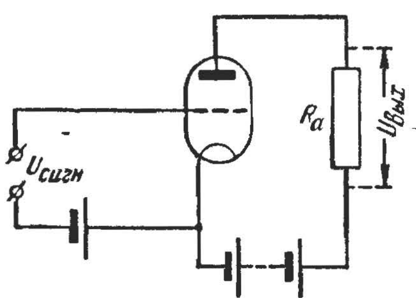
Под электрической понимается мощность, которая выделяется на нагрузке выходной ступени и может быть измерена непосредственно с помощью электроизмерительных приборов или подсчитана по показаниям таких приборов. Эта электрическая мощность используется для приведения в действие звукоизлучающей системы—громкоговорителя. В громкоговорителе происходит преобразование электрической энергии в энергию акустическую. Акустическая энергия или мощность приводит в колебательное движение частицы окружающего громкоговоритель воздуха, и уже эти механические колебания, воздействуя непосредственно на наше ухо, создают определенный звуковой эффект.

Таким образом, выходная мощность усилителя используется в конечном счете в виде некоторой акустической мощности. Измерение акустической мощности производится путем определения звукового давления, развиваемого излучающей системой (т. е. громкоговорителем) в определенных условиях.

Определение акустической мощности сопряжено с значительными трудностями и может производиться только в специально оборудованных акустических лабораториях.

Пересчет электрической выходной мощности в акустическую связан главным образом с определением к. п. д. громкоговорителя. Поэтому в практических условиях при конструировании приемника производится лишь электри-

ческий расчет выходной ступени, а наилучшее использование полученной выходной мощности достигается за счет применения высококачественного громкоговорителя, обладающего высокими акустическими характеристиками, в том числе высоким акустическим к. п. д.



Фиг. 1. Принципиальная схема простейшей выходной ступени.

Принципиальная схема простейшей выходной ступени изображена на фиг. 1. Для простоты рассуждений нагрузка ступени R_a на этой схеме показана включенной непосредственно в анодную цепь лампы.

Мощность электрических колебаний звуковой частоты, выделяющаяся на нагрузке, определяется по формуле

$$P_{вых} = \frac{U^2_{вых}}{R_a}, \qquad (1)$$

где $U_{вых}$ — напряжение звуковой частоты, выделяющееся на нагрузке, *в*;

R_a — сопротивление анодной нагрузки, *ом*;

$P_{вых}$ — выходная мощность, *вт*.

Если $U_{вых}$ представляет пиковое, амплитудное значение напряжения, то приведенная формула будет давать и для мощности пиковое значение. Если же $U_{вых}$ выражает действующее (эффективное) значение выходного напряжения, то и $P_{вых}$ соответственно будет представлять действующее значение выходной мощности.

В случае, когда величина $U_{вых}$ выражает амплитуду переменного напряжения, действующее значение выходной мощности определяется из следующего выражения:

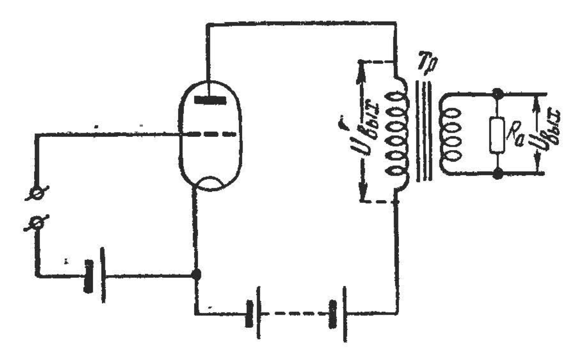
$$P_{вых.д} = \frac{U^2_{вых.ам}}{2R_a}. \qquad (2)$$

В действительных условиях по соображениям, которые будут изложены ниже, нагрузка, т. е. громкоговоритель, включается в анодную цепь лампы обычно не непосредственно, а через трансформатор. Схема выходной ступени

в этом случае принимает вид, изображенный на фиг. 2. Выходная мощность подсчитывается по той же формуле (1), если напряжение замеряется непосредственно на нагрузке. Если же напряжение замеряется на первичной обмотке трансформатора, то выходная мощность подсчитывается по формуле

$$P_{вых} = \frac{U'^2_{вых}}{n^2 R_a},$$

где $U'_{вых}$ — напряжение звуковой частоты на первичной обмотке трансформатора и n — коэффициент трансформации.



Фиг. 2. Принципиальная схема выходной ступени с трансформаторным выходом.

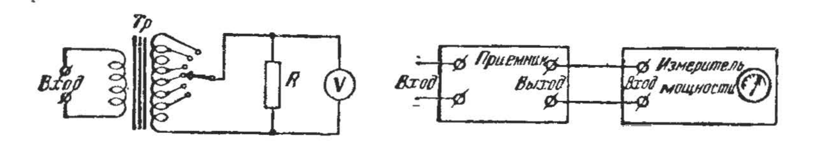
Для определения выходной мощности по приведенным выше формулам требуется измерить выходное напряжение и произвести соответствующий расчет.

Можно и непосредственно измерить выходную мощность при помощи специального прибора, непосредственно указывающего мощность, выделяющуюся на нагрузке. Такой прибор называется измерителем мощности. Принцип действия подобных измерителей мощности в самых общих чертах заключается в следующем: электроизмерительный прибор V — может быть, например, вольтметр переменного тока с купроксом — подключается к сопротивлению R, величина которого при измерениях остается неизменной (фиг. 3). Это дает возможность произвести градуировку прибора не в вольтах, а непосредственно в ваттах или милливаттах.

При измерении выходной мощности нагрузка приемника (громкоговоритель) отключается и вместо нее подключается

измеритель мощности. Но сопротивление R оказывается включенным при этом в выходную цепь приемника (или усилителя) не непосредственно, а через трансформатор Tp с регулируемым коэффициентом трансформации. Такое включение позволяет изменять величину сопротивления нагрузки для выходной лампы и, таким образом, подбирать нужное значение этой нагрузки (о пересчете сопротивления из вторичной обмотки в первичную см. стр 12).

Практические схемы подобных измерителей мощности могут иметь более сложный вид, чем приведенная на фиг. 3,



Фиг. 3. Схема измерителя мощности

так как в них обычно предусматривается возможность изменения величины сопротивления нагрузки и измерения выходной мощности в широких пределах.

До сих пор здесь говорилось о выходной мощности, отдаваемой усилительной ступенью, без уточнения качественных показателей этой мощности. Было просто показано, как подсчитывается величина мощности звуковой частоты, выделяющейся на нагрузке выходной ступени.

Однако еще в самом начале настоящей главы была сделана оговорка о так называемой «полезной выходной мощности», т. е. такой выходной мощности, которая может быть использована по прямому назначению или, иначе говоря, может быть преобразована громкоговорителем в звук.

Полезной является лишь та мощность, которую можно преобразовать в звуки без искажений или, точнее говоря, без существенных искажений, так как в некоторой степени искажения всегда сопутствуют усилению.

Вопрос о видах различных искажений и о допустимой величине тех или иных искажений при усилении низкой частоты подробнее будет рассмотрен ниже.

Для различных целей требуется выходная мощность различной величины.

Необходимая величина полезной выходной мощности определяет и те требования, которые должны быть предъявлены к выходной ступени радиоприемника. При этом следует учитывать еще и такие соображения: всякая звуковая, а особенно музыкальная, передача состоит из комбинаций звуков самой различной громкости, начиная от самых слабых (тихих) и кончая очень громкими. Так, при исполнении симфонического оркестра самые громкие звуки по мощности превышают наиболее слабые звуки в миллион и более раз (60 *дб* и больше). Очевидно, выходная ступень дожна быть так рассчитана и выполнена, чтобы могла обеспечивать неискаженную передачу самых громких звуков и соответственно этому должна быть рассчитана и максимальная выходная мощность этой ступени. Средняя же звуковая мощность, которую отдает выходная ступень во время передачи, составляет обычно лишь небольшую часть от этой максимальной мощности. Эта средняя мощность и определяет среднюю громкость звука, которую слышит наше ухо при данной передаче.

Чтобы представить себе, с какими мощностями приходится иметь дело в различных условиях, в таблице приведены ориентировочные цифры для средней мощности, соответствующей тому или иному случаю.

Характер воспроизводимой передачи и условия слушания	Средняя выходная мощность	Примечание
1. Громкость, необходимая для слушания без всякого напряжения речевой передачи в тихой жилой комнате средних размеров	25—50 *мвт*	При динамическом громкоговорителе обычного типа
2. Громкость, необходимая для слушания речевой и музыкальной передачи в шумной комнате, в которой ведутся разговоры обычным голосом, слышен шум улицы и т. п.	100—200 *мвт*	То же
3. Очень громкое воспроизведение музыкальной передачи в жилой комнате, во время которой возможен разговор только громким голосом	0,5 *вт*	То же
4. Очень громкая передача в большом помещении, вмещающем до 50 чел. в условиях, аналогичных п. 3	1—2 *вт*	То же

Наибольшая полезная выходная мощность, обеспечиваемая выходной ступенью, должна быть в несколько раз больше необходимой средней мощности для данных условий. Обычно принято считать, что максимальная выходная мощность должна быть в 10 раз больше мощности, необходимой для получения средней громкости. Для экономичных приемников (с батарейным питанием) берется меньший коэффициент запаса мощности.

Практически, при работе с динамическим громкоговорителем обычного типа можно ограничиться следующими значениями мощности выходной ступени.

1. Для батарейных приемников, которые должны обеспечивать достаточно громкий прием в жилой комнате средних размеров при отсутствии посторонних шумов, 0,15—0,2 *вт*.

2. Для сетевых приемников, обеспечивающих громкий прием в жилой комнате средних размеров в обычных бытовых условиях, 0,5—1 *вт*.

3. Для сетевых приемников, обеспечивающих громкий прием в шумной жилой комнате больших размеров, 3—5 *вт*.

Когда необходимо обеспечить высококачественное воспроизведение музыкальных передач с громкостью, приближающейся к силе звучания играющего оркестра, упомянутый выше коэффициент запаса должен быть гораздо больше. Поэтому для высококачественных приемников индивидуального пользования полезная мощность выходной ступени доводится иногда до десяти и более ватт. Чем больше этот коэффициент запаса, тем меньше будут искажаться самые громкие звуки и воспроизводимая приемником передача будет, как говорят, отличаться большей «сочностью» звучания. Предел увеличения мощности выходной ступени определяется экономическими соображениями; объясняется это тем, что стоимость самого усилителя в значительной мере зависит от стоимости его выходной ступени. Стоимость же последней определяется величиной выходной мощности.

Как уже отмечалось ранее, выходная мощность является хотя и главным, но все же не единственным показателем, определяющим громкость звучания. Весьма существенное значение имеет также и качество громкоговорителя. В зависимости от конструкции громкоговорители могут обладать различным к. п. д., и, следовательно, при одинаковой подводимой мощности они могут создавать неодинаковое звуковое давление. Из нескольких громкоговорителей лучшим яв-

ляется тот, который развивает большее звуковое давление при одной и той же подводимой электрической мощности. Повышение к. п. д. громкоговорителей приобретает исключительное значение для приемников с батарейным питанием, так как это позволяет уменьшить мощность выходной ступени, а вместе с этим уменьшить потребление тока от батарей, т. е. повысить экономичность питания приемника.

ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ ВЫХОДНАЯ МОЩНОСТЬ

Учитывая, что выходную мощность создает лампа оконечной ступени, нетрудно понять и то значение, которое уделяется выбору типа лампы при расчете этой ступени.

Принцип работы выходной лампы заключается, как известно, в том, что под действием некоторого, относительно небольшого, переменного напряжения звуковой частоты, подводимого к сетке лампы, в ее анодной цепи создаются усиленные колебания анодного тока. Проходя через анодную нагрузку, эти колебания выделяют в ней некоторую мощность той же звуковой частоты. В зависимости от типа лампы и от режима ее использования на нагрузке может быть получена бо́льшая или меньшая мощность. Для ламп, применяемых в радиовещательных приемниках, выходная мощность колеблется в пределах от десятых долей ватта — у приемников с батарейным питанием — до десяти и даже более ватт — у приемников с питанием от сети.

Исключительно ценным свойством выходных ламп, как, впрочем, и всяких других усилительных ламп, является то, что, отдавая в анодной цепи значительную колебательную мощность переменного тока, в то же время они сами в цепи сетки либо совершенно не потребляют, либо если и потребляют, то крайне незначительную мощность. Это значит, что на создание в анодной цепи лампы той или иной мощности звуковой частоты практически не затрачивается никакой мощности этой же частоты в самом приемнике[1].

Мощность звуковой частоты в анодной цепи лампы выделяется за счет электроэнергии, потребляемой лампой от источников питания, т. е. от анодной батареи, выпрямителя или другого источника тока. Лампа же сама по себе является лишь регулятором расхода этой энергии, работающим

---

[1] Исключение составляют лишь случаи, когда лампа выходной ступени работает в режиме класса В. Особенности этого режима рассматриваются на стр. 43—46.

под действием переменного напряжения, подводимого к ее сетке. Изменения потенциала сетки вызывают изменения величины тока в анодной цепи лампы, т. е. тока, отдаваемого анодной батареей. Особенно ценным свойством лампы является то, что она служит регулятором безинерционным, способным реагировать и управлять токами любой частоты не только в пределах звукового диапазона, но и диапазона радиочастот.

Но несмотря на это ценное свойство, лампа в энергетическом отношении является далеко не совершенным прибором. Скорее даже наоборот: по своим энергетическим показателям, по к. п. д. усилительную лампу надо отнести к категории весьма несовершенных приборов. Объясняется это тем, что для своей работы она требует затраты известной энергии на накал катода и некоторой энергии на создание постоянной слагающей анодного тока. А более сложные лампы, как пентод, тетрод и др., потребляют еще некоторую долю дополнительной энергии на питание цепи экранирующей сетки.

Таким образом, полный к. п. д. выходной лампы следовало бы выразить так:

$$\eta = \frac{P_{вых}}{P_н + P_a + P_э} = \frac{P_{вых}}{I_н \cdot U_н + I_a \cdot U_a + I_э \cdot U_э}.$$

где $P_н$ — мощность накала;

P_a — мощность, расходуемая в анодной цепи лампы;

$P_э$ — мощность, расходуемая в цепи экранирующей сетки;

$I_н$ и $U_н$ — соответственно ток и напряжение накала;

I_a и U_a — соответственно анодный ток и анодное напряжение;

$I_э$ и $U_э$ — соответственно ток и напряжение в цепи экранирующей сетки.

Коэффициент полезного действия η для большинства выходных ламп очень невелик и обычно не превышает 15—20%.

Повысить к. п. д. можно применением в приемнике или усилителе двухтактной выходной ступени с лампами специальной конструкции (пентодами или тетродами), работающими в режиме класса АВ или В (см. стр. 43—46).

Ниже приводятся некоторые примеры, иллюстрирующие сказанное.

1. Триод 6В4 (одна из лучших триодных выходных ламп).

Потребление мощности этой лампой характеризуется следующими цифрами:[1]

Накал — Анод

$$\left.\begin{aligned}U_н&=6{,}3в\\ I_н&=1а\end{aligned}\right\}P_н=6{,}3\ вт;\qquad \left.\begin{aligned}U_a&=250\ в\\ I_a&=60\ ма\end{aligned}\right\}P_a=15\ вт.$$

Полезная выходная мощность $P_{вых}=3{,}5$ *вт*. Отсюда к. п. д этой лампы равен:

$$\eta=\frac{P_{вых}}{P_н+P_a}=\frac{3{,}5}{6{,}3+15}\cdot 100\approx 16\%.$$

2. Лучевой тетрод 6V6:

Накал — Анод

$$\left.\begin{aligned}U_н&=6{,}3\ в\\ I_н&=0{,}45\ а\end{aligned}\right\}P_н=2{,}9\ вт;\qquad \left.\begin{aligned}U_a&=250\ в\\ I_a&=45\ ма\end{aligned}\right\}P_a=11{,}25\ вт;$$

Экран

$$\left.\begin{aligned}U_э&=250\ в\\ I_э&=4{,}5\ ма\end{aligned}\right\}P_э=1{,}1\ вт.$$

Полезная выходная мощность $P_{вых}=4{,}5$ *вт*. Отсюда к. п. д. равен:

$$\eta=\frac{P_{вых}}{P_н+P_a+P_э}=\frac{4{,}5}{2{,}9+11{,}25+1{,}1}\cdot 100\approx 30\%.$$

Тот же лучевой тетрод 6V6 в двухтактной схеме класса AB_1 (с большим смещением на сетке).

Потребление для двух ламп:

Накал — Анод — Экран

$$P_н=5{,}8\ вт;\qquad \left.\begin{aligned}U_a&=250\ в\\ I_a&=70\ ма\end{aligned}\right\}P_a=17{,}5\ вт;\qquad \left.\begin{aligned}U_э&=250\ в\\ I_э&=5\ ма\end{aligned}\right\}P_э=1{,}25\ вт.$$

Полезная выходная мощность с двух ламп $P_{вых}=10$ *вт*. Таким образом, к. п. д. равен:

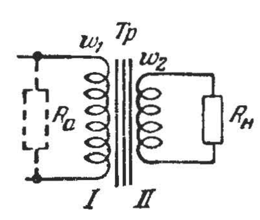
$$\eta=\frac{10}{5{,}8+17{,}5+1{,}25}\cdot 100\approx 38\%.$$

Наилучшее использование выходной лампы достигается при правильном расчете выходной ступени и правильном

---

[1] Типовые данные о режиме работы ламп приведены на стр. 54—56.

выборе элементов последней. Для того чтобы выходная лампа отдавала максимальную полезную мощность, нужно в первую очередь подобрать для нее наивыгоднейшую анодную нагрузку. Эта задача является чрезвычайно существенной, так как одна и та же лампа может отдавать бо́льшую или меньшую полезную мощность в зависимости от того, насколько правильно подобрана величина сопротивления анодной нагрузки. Определить оптимальную величину сопротивления анодной нагрузки можно либо экспериментальным путем (например, с помощью измерителя мощности), либо расчетным по характеристикам лампы. Экспериментальный метод заключается в измерении мощности, выделяющейся в нагрузке при различных значениях ее сопротивления. Из расчетных методов наиболее распространенным и удобным является графический способ расчета по семейству анодных характеристик лампы. Этот способ позволяет определять не только величину выходной мощности при различных значениях сопротивления анодной нагрузки, но одновременно с этим и величину нелинейных искажений, которыми будет сопровождаться усиление.



Фиг. 4. Пересчет сопротивления нагрузки в первичную обмотку трансформатора.

Графический метод расчета выходной ступени описывается ниже.

Наивыгоднейшее сопротивление нагрузки для наиболее распространенных типов выходных ламп составляет обычно несколько тысяч ом. Между тем, сопротивление звуковой катушки громкоговорителя, которая служит нагрузкой лампы выходной ступени, измеряется несколькими омами. Согласование реальной нагрузки (громкоговорителя) с нагрузкой, требуемой лампой, достигается при помощи выходного трансформатора. Если отношение числа витков первичной обмотки выходного трансформатора к числу витков во вторичной его обмотке $w_1/w_2 = n$ (фиг. 4), а величина сопротивления громкоговорителя $R_н$, то сопротивление, пересчитанное в первичную обмотку (а вместе с тем и в анодную цепь лампы), будет выражаться как:

$$R_a = R_н \cdot n^2. \qquad (3)$$

Зная величину наивыгоднейшего сопротивления нагрузки и сопротивление громкоговорителя, можно подсчитать коэффициент трансформации выходного трансформатора и, таким образом, согласовать нагрузку с лампой.

Например, для лампы 6V6 наивыгоднейшее сопротивление анодной нагрузки составляет 5 000 *ом.* У типового динамического громкоговорителя сопротивление звуковой катушки $R_н$ составляет обычно около 4 *ом.* Следовательно (см. формулу 3), выходной трансформатор должен иметь коэффициент трансформации:

$$n=\sqrt{\frac{R_a}{R_н}}=\sqrt{\frac{5\,000}{4}}\approx 35.$$

В выходных ступенях радиоприемников и усилителей небольшой мощности применяются лампы трех видов: 1) триоды; 2) пентоды; 3) тетроды лучевого типа.

Каждому из этих видов ламп свойственны те или иные характерные особенности. Забегая несколько вперед, поскольку вопрос об искажениях при усилении рассматривается дальше, укажем некоторые из этих особенностей.

Так, триоды обладают малым внутренним сопротивлением, что является весьма ценным свойством в отношении частотных искажений; но одновременно с этим триоды отличаются малой чувствительностью по мощности, т. е. для получения заданной выходной мощности требуется подавать на управляющую сетку триода большое напряжение сигнала звуковой частоты.

Пентоды обладают значительно более высоким внутренним сопротивлением и поэтому ведут себя хуже в отношении частотных искажений в области низких звуковых частот. Но зато они отличаются высокой чувствительностью по мощности. Поэтому для получения от пентода такой же выходной мощности можно подводить к его управляющей сетке значительно меньшее напряжение сигнала, чем к сетке триода.

Лучевые тетроды, обладая всеми свойствами пентодов в отношении чувствительности и внутреннего сопротивления, отличаются в то же время более выгодной формой анодных характеристик и меньшим потреблением тока цепью экранирующей сетки. Это является существенным преимуществом тетродов по сравнению с пентодами. Благодаря этим ценным свойствам в выходных ступенях современных приемников применяются почти исключительно лучевые тетроды.

Из применяемых в настоящее время оконечных триодов можно отметить лампу типа 6В4 с косвенным накалом; наиболее распространенным выходным пентодом подогревного типа является лампа 6Ф6, а пентодом прямого накала — 2П1П. Широко применяемыми подогревными лучевыми тетродами являются лампы 6V6 и 6Л6 (6П3).

Для того чтобы представить себе разницу в чувствительности выходных ламп разной конструкции, можно сопоставить следующие цифры: для получения одинаковой полезной выходной мощности в 1 *вт* необходимо подать при одинаковом анодном напряжении:

на сетку лампы	6В4 (триода)	сигнал звуковой частоты в	17 $в_{эфф}$
" " "	6Ф6 (пентода)	" " "	7 "
" " "	6V6 (лучевого тетрода)	" " "	4,2 "

ИСКАЖЕНИЯ В ВЫХОДНОЙ СТУПЕНИ

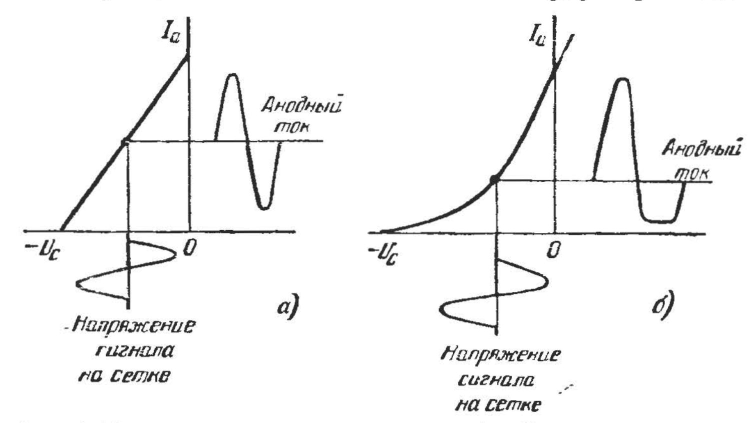
Ранее указывалось, что под полезной выходной мощностью понимается такая выходная мощность, при которой звуковая передача воспроизводится громкоговорителем без искажений, вернее без существенных для ощущения человеческим ухом искажений. Эту оговорку необходимо сделать, так как в какой-то мере искажения всегда сопутствуют усилению звуковых колебаний и, конечно, воспроизводятся громкоговорителем. Когда эти искажения незначительны, ухо их не ощущает; такие искажения считаются допустимыми. Но когда искажения превышают допустимые пределы, они сильно изменяют естественность звучания воспроизводимой громкоговорителем радиопередачи и наличие их резко ощущается на слух.

Одним из весьма нежелательных видов искажений являются так называемые нелинейные искажения, возникающие вследствие ряда причин [1] и главным образом из-за нелинейности характеристик лампы. Сущность этих искажений заключается в том, что при усилении лампой колебаний звуковой частоты искажается их форма, т. е. если до усиления колебания имели чисто синусоидальную форму, то после усиления их лампой форма колебаний анодного тока лампы в большей или меньшей степени отличается от чистой синусоиды. Такие искажения иллюстрирует фиг. 5, из которой видно, насколько сильно может отличаться форма коле-

[1] Одной из таких причин может быть, например, появление в лампе тока сетки при неправильно выбранном рабочем режиме.

баний анодного тока от чисто синусоидальных колебаний, подводимых к сетке лампы при неправильном подборе рабочего режима ламп.

Из диаграмм фиг. 5 следует, что форма изменения анодного тока лампы будет в точности соответствовать форме колебаний напряжения, подводимого к ее сетке, лишь в том случае, если колебания этого тока будут происходить



Фиг. 5. Искажение синусоидальных колебаний из-за нелинейности ламповой характеристики.

только в пределах прямолинейного участка характеристики, не заходя за точку нижнего ее перегиба (фиг. 5,*а*).

Если сеточная характеристика лампы не прямолинейна, то форма кривой анодного тока представляет как бы искаженную фотографию сеточного напряжения (фиг. 5*б*), причем искажения будут тем сильнее, чем более криволинейным оказывается охватываемый сеточным напряжением участок характеристики. Причиной таких искажений может быть неправильный выбор начального смещения на сетке лампы, или слишком большая величина подводимых колебаний, когда отрицательные полупериоды их заходят в пределы криволинейной части характеристики.

Анализ показывает, что искаженные колебания представляют уже не простое, а сложное колебание, состоящее из суммы колебаний основной (усиливаемой) частоты и целого ряда вновь появившихся так называемых гармонических частот или гармоник. Под последними понимаются частоты, кратные основной частоте. Иначе говоря, если к сетке лампы подводятся колебания с частотой f, то после усиления в анод-

ной цепи появляются кроме этой частоты еще и ее гармоники, т. е. колебания с частотой $2f$, $3f$, $4f$ и т. д. Чем сильнее выражена кривизна или нелинейность ламповой характеристики, тем больше искажаются основные (усиливаемые) колебания и тем больше будет возникать гармоник.

О степени нелинейных искажений судят по так называемому коэффициенту нелинейных искажений или коэффициенту гармоник, который указывает относительную величину содержания гармоник в усиленном колебании.

Коэффициент нелинейных искажений математически выражается как корень квадратный из отношения суммарной мощности всех гармоник к мощности основной частоты, т. е.

$$\text{коэффициент нелинейных искажений} = \sqrt{\frac{\text{мощность всех гармоник}}{\text{мощность основной частоты}}}$$

Практически, однако, производится измерение не мощности гармоник и основной частоты, а измерение токов или напряжений этих частот. С некоторым приближением можно принять, что сопротивление нагрузки (громкоговорителя) остается постоянным в области измеряемых частот (на практике это допустимо, особенно применительно к громкоговорителям динамического типа) и не вносит существенных погрешностей. Расчет показывает, что при таком допущении можно определять коэффициент нелинейных искажений не из отношения мощностей, а из отношения токов или напряжений соответствующих гармоник, что оказывается значительно более удобным с точки зрения измерений.

Если обозначить амплитуду напряжения основной частоты в цепи анода лампы через U_1, а амплитуды второй, третьей и т. д. гармоник соответственно через U_2, U_3, U_4, и т. д., то коэффициент нелинейных искажений K выразится как отношение значения действующего напряжения всех гармоник и напряжению основной частоты, т. е.

$$K = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \cdots}}{U_1}. \quad (4)$$

В случае, если измеряются не напряжения, а токи разных гармоник, то коэффициент нелинейных искажений выражается как

$$K = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \cdots}}{I_1} \quad (5)$$

где I_1, I_2, I_3, I_4 и т. д.—токи соответствующих гармоник в анодной цепи лампы.

Обычно коэффициент нелинейных искажений выражается в процентах. Для приемников высшего класса величина этого коэффициента не должна превышать 3—5% при полной мощности, для приемников второго и третьего классов — 7—10% и для наиболее простых и дешевых приемников — 12—15%.

Следует отметить, что коэффициент нелинейных искажений не дает исчерпывающей картины о всех последствиях влияний нелинейных искажений при усилении сложных колебаний, какими являются звуковые колебания, подводимые к усилителю. Этот коэффициент не учитывает роли так называемых комбинационных частот, которые возникают в результате взаимодействия между частотами, составляющими сложное звуковое колебание. Как показывает опыт, комбинационные частоты могут внести дополнительные искажения. Однако расчет и измерение комбинационных частот сопряжены со значительными затруднениями и потому на практике обычно приходится ограничиться только определением коэффициента нелинейных искажений в описанном виде. Величина этого коэффициента позволяет в некоторой степени косвенным образом судить и о комбинационных частотах.



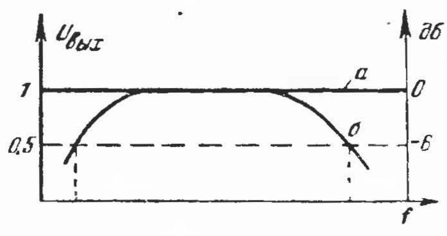
Фиг. 6. Зависимость нелинейных искажений от величины выходной мощности.

Коэффициент нелинейных искажений зависит от величины напряжения, подводимого к сетке лампы, или, что то же, от величины выходной мощности. Эта зависимость характеризуется кривой, изображенной на фиг. 6.

Величина нелинейных искажений обычно оказывается неодинаковой на разных частотах. На практике ограничиваются измерением искажений на средних частотах звукового спектра (400—1 000 *гц*), так как измерение искажений по всему диапазону звуковых частот сопряжено со значительными осложнениями чисто технического порядка. Искажения же в области средних частот звукового спектра особенно существенны, поскольку основная часть звуковой мощности при передачах разного рода приходится именно на область средних частот.

Общепринятым является мотод определения нелинейных искажений на частоте 400 *гц*; эти искажения принимаются условно за меру искажений усилителя низкой частоты.

Другим видом искажений, возникающих в выходной ступени радиоприемника, являются частотные искажения, сущность которых заключается в том, что колебания разных частот усиливаются неодинаково, т. е. усиление ступени оказывается различным для разных частот. Это приводит к тому, что усиленное напряжение на выходе приемника уже не соответствует точно по форме усиливаемому напряжению звуковой частоты. Не слишком сильно выраженные частотные искажения приводят к изменению тембра звучания; если же частотные искажения достигают значительной величины, это приводит к понижению разборчивости речевых передач и к искажению звучания музыкальных передач.



Фиг. 7. Частотная характеристика усилителя.

Идеальная частотная характеристика должна иметь вид, приведенный на фиг. 7 (линия *а*); эта характеристика показывает, что усиление остается неизменным и независимым от частоты *f* напряжения, подаваемого на вход усилителя.

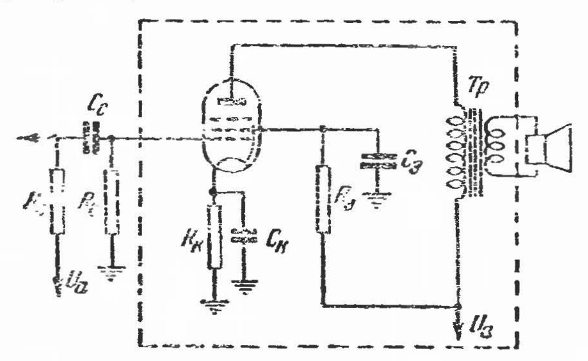
В реальных условиях частотная характеристика не имеет такой формы и обычно наблюдается уменьшение усиления в области самых низких и самых высоких частот звукового спектра (кривая *б* на фиг. 7). Поэтому считается допустимым некоторое уменьшение усиления на концах звукового диапазона, и полоса пропускания звуковых частот определяется границами частотной характеристики, при которых усиление падает в два раза (на 6 *дб*) по сравнению с усилением на некоторой средней частоте (условно такой частотой считают 400 *гц*, усиление на которой принимается за единицу).

Чрезмерное падение усиления в области низких звуковых частот влияет на натуральность звучания передачи: звук становится сухим, теряется сочность звучания, тембр передачи становится звенящим. При значительном падении усиления в области высоких звуковых частот тембр передачи

становится глухим, «бочкообразным», низкие частоты чрезмерно выделяются и подчеркиваются.

Поскольку частотные искажения создает и сам громкоговоритель, желательно, чтобы в усилительной ступени они были сведены к возможному минимуму.

Причин возникновения частотных искажений в выходной ступени может быть несколько. Если рассматривать только самую эту ступень, т. е. от сетки выходной лампы до выхода



Фиг. 8. Схема выходной ступени.

на громкоговоритель, как показано на фиг. 8 (пунктиром), то основными причинами частотных искажений будут следующие:

1. Уменьшение усиления и спадание частотной характеристики в области низких частот может быть вызвано недостаточной индуктивностью первичной обмотки выходного трансформатора и малой емкостью конденсаторов $C_к$ и $C_э$. Первая из этих причин приводит к заметному уменьшению сопротивления анодной нагрузки в области самых низких частот, а вторая (недостаточная емкость шунтирующих конденсаторов $C_к$ и $C_э$ в цепях катода и экрана лампы) может привести к заметно выраженной отрицательной обратной связи на низких частотах.

2. Уменьшение усиления и спадание характеристики в области высоких звуковых частот может быть вызвано наличием в выходной ступени индуктивности рассеяния.

Кроме того, причиной частотных искажений могут служить элементы схемы, включенные между ступенью предварительного усиления и выходной ступенью. Так, например, слишком малая емкость конденсатора C_c будет

вызывать спадание частотной характеристики в области низких частот; большая емкость монтажа, емкость лампы и другие вредные емкости могут привести к падению усиления в области высоких частот в случае, если анодная нагрузка R_a предыдущей лампы и утечка сетки R_c обладают очень большим сопротивлением.

Упоминанием этих источников частотных искажений мы и ограничимся, поскольку подробное рассмотрение этого вопроса не входит в план нашей брошюры. Вопрос об источниках искажений в усилителях низкой частоты рассматривается подробнее в отдельных выпусках массовой радиобиблиотеки, посвященных усилителям низкой частоты и их элементам.

Заканчивая раздел, посвященный характеристике основных видов искажений в выходной ступени приемника, следует лишь отметить, что источником и причиной возникновения описанных искажений является выходная лампа и элементы электрической части ступени. До недавних пор при оценке радиоприемников ограничивались определением именно таких искажений, так сказать «электрических нелинейных искажений» и «электрической частотной характеристики», которые характеризуют работу усилительной части, как таковой.

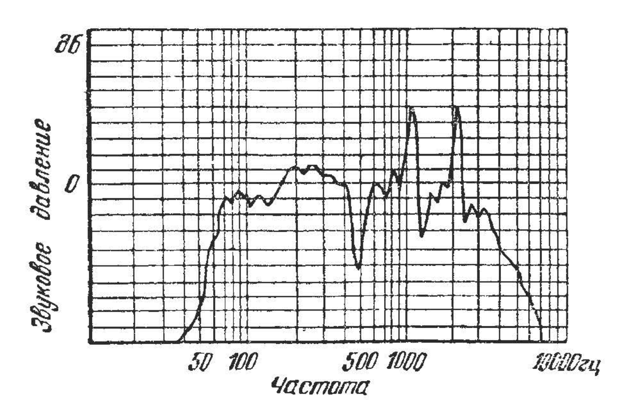
Это, однако, не давало полной картины: при оценке реальных искажений нужно учитывать не те искажения, которые происходят в усилителе, а действительные искажения звука, слышимые нашим ухом. Для этого уже недостаточно рассматривать изолированно усилительную часть, а нужно рассматривать усилитель в комплексе со звукоизлучающей системой, т. е. громкоговорителем. При этом надо учитывать искажения уже не путем измерения электрических величин — токов и напряжений, — а путем непосредственных акустических измерений по звуковому давлению.

Техника таких акустических измерений отличается значительной сложностью, но в последнее время они все шире и шире входят в практику. Разумеется, проведение подобных измерений возможно лишь в условиях специальных, хорошо оборудованных акустических лабораторий.

При акустических испытаниях вместо измерения напряжения на выходе приемника измеряется величина звукового давления, развиваемая громкоговорителем. Акустическая частотная характеристика, или, как ее называют, частотная характеристика по звуковому давлению, показывает, как

изменяется звуковое давление в зависимости от частоты сигнала, если напряжение, подводимое к сетке усилителя низкой частоты, остается постоянным при всех частотах. Нелинейные искажения измеряются таким же образом по содержанию гармоник в звуковых колебаниях, создаваемых громкоговорителем.

В акустическом отношении работа приемника определяется характеристиками громкоговорителя, и в первую очередь его частотной характеристикой. Под частотной характе-



Фиг. 9. Характеристика громкоговорителя по звуковому давлению.

ристикой громкоговорителя в данном случае подразумевается акустическая характеристика, показывающая, какое звуковое давление развивает громкоговоритель на разных частотах, если напряжение, подводимое к громкоговорителю, поддерживается неизменным на всех этих частотах. Частотные характеристики такого рода всегда имеют вид сильно изломанных линий, говорящих о том, что звуковое давление меняется в широких пределах на разных частотах и лишь среднее значение его может быть выражено более или менее плавной кривой. Типичная характеристика такого рода изображена на фиг. 9. Такая форма характеристики объясняется тем, что громкоговоритель представляет весьма сложную колебательную систему, обладающую массой частных резонансов, которые вызывают появление на характеристике либо пиков, либо провалов.

Из кривой фиг. 9 наглядно видно, что на частоте, например, 500 *гц* характеристика имеет провал, т. е. излучаемая громкоговорителем на этой частоте звуковая мощность будет

мала; на частоте же 1 000 *гц*, наоборот, на характеристике имеется пик, указывающий, что на этой частоте громкоговоритель имеет лучшую отдачу и излучаемая звуковая мощность возрастает.

При такой форме характеристики громкоговорителя получается совершенно своеобразная картина в отношении нелинейных искажений, воспринимаемых ухом. Если, например, нелинейные искажения по звуковому давлению измеряются на частоте 500 *гц* (на провале характеристики), то вторая гармоника—1 000 *гц*—содержащаяся в выходном напряжении и равная, допустим, 10%, будет создавать звуковое давление, не пропорциональное этим 10%, а гораздо большее, поскольку частота 1 000 *гц* попадает как раз на пик частотной характеристики громкоговорителя (фиг. 9). Может случиться, что и другие гармоники также совпадут с пиками этой характеристики, как, например, на фиг. 9 четвертая гармоника в 2 000 *гц*. Это приведет к тому, что действительные нелинейные искажения, слышимые нашим ухом, будут значительно больше искажений, создаваемых электрической частью усилителя.

Картина может оказаться и обратной, если основному тону будет соответствовать пик, а гармоникам—провалы на характеристике. В этом случае нелинейные искажения по звуковому давлению, т. е. действительно слышимые ухом, окажутся меньше, чем у самого усилителя, как такового.

Все эти явления отсутствовали бы, если бы акустическая характеристика громкоговорителя по звуковому давлению представляла равномерную линию.

Изложенные выше обстоятельства следует иметь в виду при оценке работы радиоприемника.

Оценка промышленных образцов радиоприемников в настоящее время производится обязательно по акустическим характеристикам.

Так как в любительских условиях невозможно произвести акустические измерения, то при конструировании радиоприемника нужно стараться применять громкоговорители, обладающие хорошей акустической характеристикой.

РАСЧЕТ ВЫХОДНОЙ СТУПЕНИ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЛАМПЫ

Данные, достаточно характеризующие наиболее подходящую для выходной ступени лампу, могут быть обычно получены из типовых заводских характеристик ламп или из каталога. В последнем обычно приводятся основные величины,

характеризующие лампу, а именно: рекомендуемый режим, ориентировочные значения токов во всех цепях, оптимальная величина анодной нагрузки, гарантируемое значение выходной мощности в указываемом режиме и др. По этим данным выбирают тип лампы, наиболее отвечающий поставленным требованиям, и рассчитывают основные элементы схемы, в том числе и выходной трансформатор, поскольку в типовых характеристиках приводится и рекомендуемое значение анодной нагрузки для данной лампы.

Во многих случаях лампа, однако, используется в режиме, не совпадающем точно с типовым, указываемым в ее заводском паспорте. Это может иметь место в силу целого ряда причин, например: а) из-за необходимости использовать лампу в более экономичном режиме, с меньшим расходом анодного тока; б) при наличии источника питания, дающего более высокое анодное напряжение, которое допустимо для данного типа ламп, но отличается от приводимого в типовых характеристиках; в) при необходимости использовать лампу с нагрузкой, отличающейся от рекомендованной в типовых характеристиках, и т. д. На практике могут встретиться и многие другие обстоятельства, заставляющие несколько отклониться от использования режима, указанного в типовом паспорте лампы.

В таких случаях расчет выходной ступени, определяющий наивыгоднейшую величину анодной нагрузки и величину выходной мощности, получаемой в том или ином режиме при заданном значении коэффициента нелинейных искажений, можно произвести по семейству анодных характеристик выбранной лампы. График с семейством характеристик, как правило, всегда приводится в заводском паспорте лампы. Такой способ расчета является наиболее простым и удобным; описание его приводится ниже.

Рассмотрим вначале, как производится расчет мощности и нелинейных искажений выходной ступени с лампой триодного типа.

Семейство анодных характеристик триода приведено на фиг. 10.

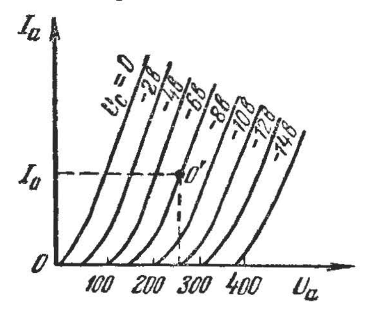
Прежде чем переходить к рассмотрению метода расчета, установим некоторые исходные положения, которые понадобятся нам в дальнейшем.

Если амплитуду анодного тока звуковой частоты обозначить через I_m, а амплитуду переменного напряжения звуковой частоты на нагрузке — через U_m, то эффектив-

ное или действующее значение тока и напряжения будут выражаться соответственно как $I_m/\sqrt{2}$ и $U_m/\sqrt{2}$. Тогда действующее значение выходной мощности $P_{вых}$ может быть выражено как

$$P_{вых} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m \cdot I_m}{2}. \qquad (6)$$

Из этого выражения следует, что для получения максимальной выходной мощности при данном значении переменного напряжения, подводимого к управляющей сетке, нужно стремиться получить в анодной цепи лампы наибольшие возможные значения переменных составляющих тока и напряжения. Поскольку здесь имеется в виду наличие в анодной цепи лампы некоторой нагрузки, легко заметить, что выбор величины этой нагрузки будет иметь решающее значение для нахождения наивыгоднейших условий использования лампы. Для увеличения амплитуды переменного тока нужно, очевидно, чтобы сопротивление нагрузки было возможно меньше, но для увеличения амплитуды напряжения на этой нагрузке, наоборот, нужно, чтобы это сопротивление имело некоторую определенную величину.



Фиг. 10. Семейство анодных характеристик триода.

Наибольшая выходная мощность будет получена при некотором значении сопротивления нагрузки R_a, которое будет находиться в определенном соотношении с внутренним сопротивлением лампы, являющейся в данном случае источником выходной мощности.

В электротехнике существует известное правило: наибольшая мощность может быть получена в нагрузке, сопротивление которой равно внутреннему сопротивлению источника электрической энергии. Для ламп такое соотношение оказывается неправильным. Для определения наивыгоднейших условий использования лампы приходится производить специальные расчеты, учитывая целый ряд дополнительных факторов.

Рассмотрим основные соображения, которыми приходится руководствоваться при расчете полезной выходной мощности, отдаваемой лампой.

Для упрощения расчета предполагаем, что активное сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора невелико и поэтому падением напряжения постоянного тока на этой обмотке можно пренебречь. Тогда напряжение на аноде лампы будет равно напряжению источника питания. В большинстве случаев такое упрощение вполне допустимо. Далее задаемся значением исходного сеточного смещения, при котором будет работать лампа. Величину этого смещения приходится выбирать в зависимости от конкретных требований, предъявляемых к усилителю; при этом обязательно надо соблюдать одно основное условие — мощность рассеяния на аноде лампы P_a (т. е. произведение из начального анодного тока I_0 на анодное напряжение U_a) при выбранном смещении ни в коем случае не должна превышать допустимого значения, указываемого в заводском паспорте лампы.

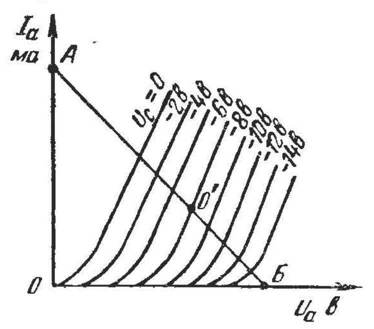
Исходная рабочая точка O' располагается на той характеристике, которая соответствует выбранному начальному сеточному смещению (например, $U_c = -6$ *в*) и определяется величиной анодного напряжения (например, $U_a = 250$ *в*).

При подаче на сетку лампы переменного напряжения анодный ток будет изменяться в соответствии с этим напряжением. Во время положительных полупериодов переменного напряжения величина отрицательного смещения на сетке будет уменьшаться, а во время отрицательных полупериодов смещение будет увеличиваться, так как отрицательное напряжение сигнала будет добавляться к начальному напряжению смещения. Очевидно, при положительных полупериодах величина анодного тока будет возрастать, а при отрицательных — падать, т. е. в анодной цепи появится переменная составляющая анодного тока. Но для переменного тока анодная нагрузка представляет большое сопротивление и поэтому колебания анодного тока будут приводить к появлению на этой нагрузке переменного напряжения $U = I \cdot R_a$, где I — величина переменной составляющей анодного тока в миллиамперах, а R_a — сопротивление анодной нагрузки в килоомах. В результате действительное напряжение на аноде лампы $U_д$ в каждый данный момент будет складываться из постоян-

ного напряжения источника питания и из переменного напряжения, образующегося на нагрузке,

$$U_д = U_а + U.$$

Поскольку напряжение U в течение половины периода совпадает по знаку с напряжением источника питания, в течение этого полупериода напряжение на аноде будет возрастать; в течение второго полупериода напряжение U будет противоположно по знаку напряжению источника питания, а следовательно, напряжение на аноде лампы будет уменьшаться. Величина анодного тока в каждый момент определяется величиной действительного напряжения на сетке и на аноде лампы. Поэтому для получения полной картины изменения анодного тока выходной лампы при подаче на ее сетку переменного напряжения нужно располагать данными, позволяющими учесть все изложенное выше. Такие данные могут быть получены из семейства анодных характеристик лампы.



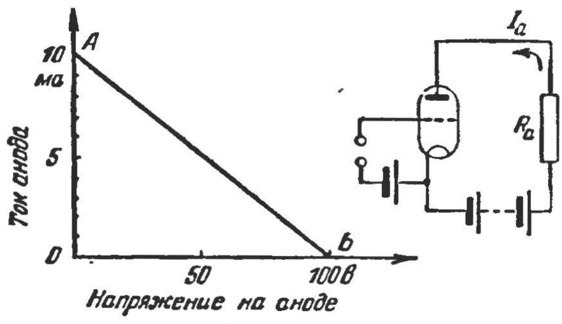
Фиг. 11. Семейство анодных характеристик с нагрузочной линией.

Для этого на упомянутых характеристиках надо произвести построение, дающее возможность определить влияние сопротивления нагрузки. Это построение сводится к тому, что через исходную рабочую точку O' проводится так называемая нагрузочная линия $АБ$ (фиг. 11). Наклон этой линии определяется величиной сопротивления нагрузки. Нагрузочная линия позволяет определить, как изменяется анодный ток лампы при наличии в ее анодной цепи нагрузки, обладающей некоторым сопротивлением.

Остановимся несколько подробнее на пояснении смысла нагрузочной линии. Такую линию можно изобразить на диаграмме вначале без семейства ламповых характеристик.

Нагрузочная линия, проведенная на фиг. 12, соответствует сопротивлению нагрузки, равному 10 000 *ом*, и источнику напряжения в 100 *в*: предполагается, что нагрузка $R_а$ представляет чисто омическое сопротивление.

Будем считать, что по горизонтальной оси откладывается напряжение U_a, которое имеется в действительности на аноде лампы. Очевидно, что полное напряжение в 100 *в* будет на аноде лампы только в том случае, если падение напряжения на нагрузке R_a будет равно нулю, т. е. когда анодный ток тоже равен нулю. Точка *Б* на диаграмме фиг. 12 соответствует этому условию. Другой



Фиг. 12. Нагрузочная линия.

предельной точкой будет точка *А*, которая соответствует случаю, когда все напряжение источника падает на нагрузке и напряжение на аноде лампы оказывается равным нулю. Это, очевидно, могло бы быть при анодном токе, равном 10 *ма*, так как

$$\text{ток} = \frac{\text{падению напряжения на сопротивлении}}{\text{сопротивление нагрузки}} = \frac{100\ \textit{в}}{10\,000\ \textit{ом}} = 10\ \textit{ма}.$$

В соответствии с законом Ома соотношение между током и падением напряжения на сопротивлении нагрузки будет выражаться прямой линией, проходящей через крайние точки *А* и *Б*, которая и называется нагрузочной линией. Наклон этой линии определяется отношением отрезка *ОА* к отрезку *ОБ*, которое будет равно величине $1/R_a^*$, т. е.

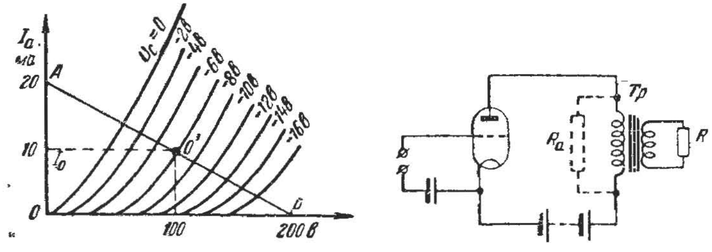
$$\frac{OA}{OБ} = \frac{I}{U} = \frac{1}{R_a}.$$

Очевидно, чем больше значение R_a, тем более полого пойдет нагрузочная линия.

---

* Мы говорим об абсолютной величине отношения, не учитывая его знака, который в данном случае не играет роли.

Если нагрузка включается в анодную цепь лампы посредством трансформатора, то нагрузочная линия расположится несколько иначе. Допуская, как указывалось ранее, что активное сопротивление первичной обмотки трансформатора очень мало, можно считать, что при отсутствии сигнала, т. е. при анодном токе покоя, падением напряжения на трансформаторе можно пренебречь. Следовательно, при этих условиях все напряжение анодной батареи будет поступать на анод лампы. Ток покоя будет



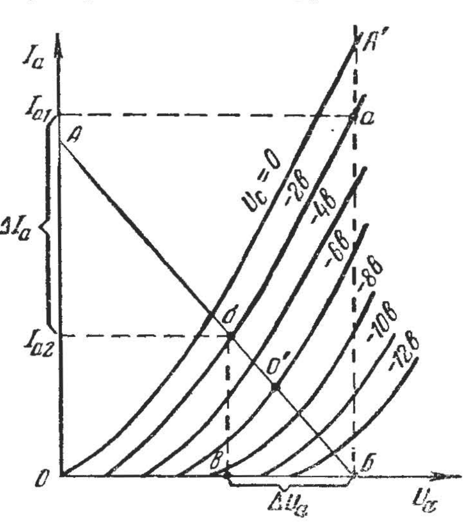
Фиг. 13. Нагрузочная линия для нагрузки, включенной через трансформатор.

зависеть только от величины смещения U_c на сетке. На диаграмме фиг. 13 это условие определяется точкой O'. Но для переменной слагаемой анодного тока нагрузку будет представлять уже сопротивление R_a, пересчитанное из вторичной обмотки трансформатора в первичную, и для токов звуковой частоты нагрузочная линия будет определяться именно величиной этого сопротивления.

Если $R_a = 10\,000$ *ом*, то наклон линии остается таким же, как и в предыдущем случае (фиг. 12), но линия эта должна пройти через исходную рабочую точку O', как показано на фиг. 13. При этом должно соблюдаться условие, что $R_a = ОБ/ОА$, где R_a — величина сопротивления нагрузки в килоомах, $ОБ$ — отрезок по горизонтальной оси, выраженный в вольтах, и $ОА$ — отрезок по вертикальной оси, выраженный в миллиамперах.

Смысл пользования нагрузочной линией заключается в том, что величина анодного тока, соответствующая различным значениям напряжения на сетке лампы, при наличии нагрузки в ее анодной цепи, определяется точкой пересечения нагрузочной линии с анодной характеристикой, соответствующей данному значению U_c. При отсутствии нагрузки ($R_a = 0$) анодное напряжение остается неизмен-

ным и анодный ток при разных значениях напряжения на сетке будет определяться точками пересечения характеристик диаграммы с линией *А'Б*, проходящей перпендикулярно через точку *Б*, соответствующую напряжению анодной батареи (фиг. 14). При наличии нагрузки всякое увеличение анодного тока, как следует из сказанного ранее, вызывает снижение напряжения, действующего на аноде лампы. Это обстоятельство и учитывается построением нагрузочной линии.



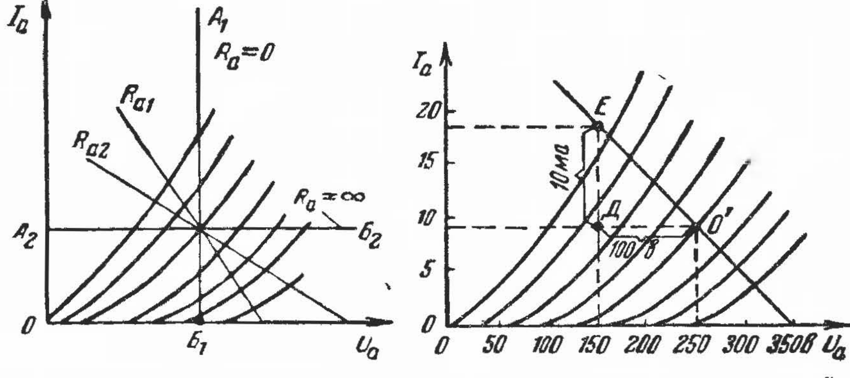
Фиг. 14. Нагрузочная линия.

Например, при $R_a = 0$ и при $U_c = -2$ *в* (фиг. 14, точка *а*) анодный ток имеет значение I_{a1}; при анодной нагрузке R_a (линия *АБ*) и при том же смещении $U_c = -2$ *в* (точка *б*) анодный ток I_{a2} будет уже значительно меньше. Отрезок *вБ* на горизонтальной оси показывает величину падения напряжения ΔU_a на нагрузке, которое определяется, как произведение из сопротивления нагрузки R_a на величину изменения анодного тока ΔI_a, т. е. $\Delta U_a = R_a \cdot \Delta I_a$. Очевидно, разным значениям R_a будут соответствовать и разные значения ΔI_a и ΔU_a.

Предельным положением нагрузочной линии при трансформаторном включении нагрузки и при $R_a = 0$ будет линия $A_1 Б_1$, перпендикулярная к горизонтальной оси, и при $R_a = \infty$ линия $A_2 Б_2$, параллельная горизонтальной оси (фиг. 15). При всех других значениях R_a нагрузочная линия будет занимать какие-то промежуточные положения.

Для удобства построения нагрузочной линии можно поступать следующим образом. Пусть требуется построить прямую, соответствующую значению нагрузки $R_a = 10\,000$ *ом*. Через исходную точку *О'* (фиг. 16) проводим горизонтальную прямую и откладываем на ней влево от-

резок *О'Д*, равный, например, 100 *в*. Из конца этого отрезка восстанавливаем вверх перпендикуляр, на котором откладываем отрезок *ДЕ*, соответствующий по своей длине



Фиг. 15. Нагрузочные линии для нагрузок с разным сопротивлением.

Фиг. 16. Построение нагрузочной линии.

в данном случае величине тока 100 *в*/10 000 *ом* = 0,01 *а* = = 10 *ма*. Проведя прямую через полученную таким образом точку *Е* и через точку *О'*, получаем требуемую нагрузочную линию.

Фиг. 17. Семейство анодных характеристик с нагрузочной линией.

Наибольшее значение переменного напряжения, которое можно подать на сетку лампы, не должно вызывать у последней появления сеточного тока.

Для случая, которому соответствует диаграмма фиг. 11, амплитуда напряжения на сетке не должна превышать 6 *в*.

Теперь можем подсчитать, какую мощность будет давать лампа при нагрузке, равной 10 000 *ом* (фиг. 17). При амплитудных значениях напряжения на сетке анодный ток будет иметь значения, соответствующие точками *А* и *Б*. Максимальное значение анодного тока обозначим $I_{макс}$,

а минимальное — $I_{мин}$; напряжение, которое будет на аноде при $I_{макс}$, обозначим $U_{мин}$, а напряжение при $I_{мин}$ через $U_{макс}$. Приближенно можно считать, что амплитуда тока звуковой частоты $I_m = (I_{макс} - I_{мин})/2$, а амплитуда напряжения той же частоты $U_a = (U_{макс} - U_{мин})/2$.

Тогда, учитывая, что $P_{вых} = I_m \cdot U_m/2$, можно выходную мощность $P_{вых}$ подсчитать по формуле

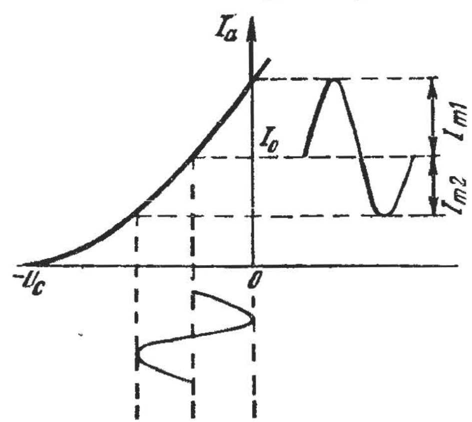
$$P_{вых} = \frac{(I_{макс} - I_{мин}) \cdot (U_{макс} - U_{мин})}{8} \qquad (7)$$

Графически выходная мощность будет выражаться как $^1/_4$ площади прямоугольного треугольника с катетами *АВ* и *ВБ*.

Для неискаженного усиления нужно, чтобы соблюдалось соотношение *АГ* = *ГВ* или, что то же, *АО'* = *О'Б*, а это будет иметь место в том случае, если анодные характеристики располагаются равномерно. В действительности же, с увеличением смещения характеристики после некоторого значения U_c начинают итти в области малых токов все теснее. Это приводит к тому, что положительные амплитуды анодного тока (*АГ*) будут больше отрицательных (*ГВ*); то же относится и к амплитудам переменного напряжения. Следствием такого явления будет то, что чисто синусоидальное колебание, подведенное к сетке лампы, исказится в ее анодной цепи—одна половина периода колебания тока будет по форме отличаться от второй половины.

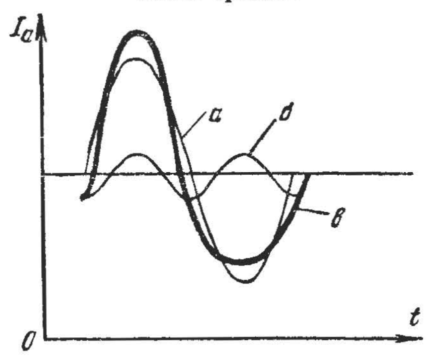
Если мы заметим токи, соответствующие точкам пересечения нагрузочной линии с анодными характеристиками, снятыми при разных значениях смещения на сетке, а затем по этим точкам построим новую кривую, но уже в других координатах, откладывая по горизонтальной оси величину смещения на сетке, а по вертикальной—величину анодного тока, то мы получим так называемую динамическую характеристику лампы (фиг. 18), показывающую, как изменяется анодный ток лампы под действием напряжения на сетке и при наличии нагрузки в анодной цепи. Эта характеристика дает уже картину действительной зависимости анодного тока от напряжения на сетке в рабочем или динамическом режиме. Динамическая характеристика идет более полого, чем статическая характеристика лампы, так как вследствие наличия сопротивления в анодной цепи

ток в этой цепи при изменениях напряжения на сетке изменяется менее резко. Действительную форму переменного тока в анодной цепи мы получим, сделав построение, приведенное на фиг. 18. Для триода, используемого в качестве выходной лампы, как установлено выше, кривая анодного тока будет несимметричной вследствие кривизны динамической характеристики в ее нижней части при малых значениях анодного тока.



Фиг. 18. Динамическая характеристика триода.

Анализ показывает, что в такой несимметричной кривой будет кроме основной частоты содержаться главным образом вторая гармоника этой частоты. Это объясняется графическим построением, приведенным на фиг. 19. Без сколько-нибудь заметного ущерба для точности можно считать, что в таком случае коэффициент нелинейных искажений определяется процентным содержанием второй гармоники в анодном токе или в анодном напряжении; этот коэффициент K_2 можно определить, пользуясь теми же обозначениями, которые были использованы выше, по формуле



Фиг. 19. Искажение синусоидального колебания вследствие появления второй гармоники.

а — синусоида основной частоты; *б* — вторая гармоника; *в* — сумма основного колебания с второй гармоникой.

$$K_2 = \frac{0{,}5\,(I_{макс} + I_{мин}) - I_0}{I_{макс} - I_{мин}} \cdot 100\%, \qquad (8)$$

где I_0 — рабочий ток в исходной точке, или, иначе, — ток покоя. Содержанием гармоник высших порядков можно в этом случае практически пренебречь.

Вместо $I_{макс}$ и $I_{мин}$ можно воспользоваться значениями амплитуд переменного тока в анодной цепи. Обозначим их через $I_{m\ макс}$ и $I_{m\ мин}$ (причем $I_{m\ макс} = АГ$ и $I_{m\ мин} = ГВ$). В этом случае

$$K_2 = \frac{I_{m\ макс} - I_{m\ мин}}{2(I_{m\ макс} + I_{m\ мин})} \cdot 100\% = \frac{АГ - ГВ}{2(АГ + ГВ)} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Иногда может оказаться более удобным вместо $АГ$ и $ГВ$ пользоваться пропорциональными им отрезками $O'А$ и $O'Б$,

Тогда

$$K_2 = \frac{O'А - O'Б}{2(O'А + O'Б)} \cdot 100\% \quad \text{или} \quad K_2 = \frac{а - б}{2(а + б)} \cdot 100\%. \quad (10)$$

Для триодов наивыгоднейшая нагрузка $R_{a\ опт}$, при которой может быть получена наибольшая выходная мощность, равна:

$$R_{a\ опт} = 2R_i\ ^*.$$

На практике наивыгоднейшую нагрузку можно определить, проводя нагрузочные прямые под различными углами и находя такое положение, при котором $O'А$ будет как можно ближе по величине к $O'В$. Это положение можно найти при помощи линейки, наложенной на семейство характеристик так, чтобы она проходила через начальную рабочую точку. Вращая линейку вокруг этой точки, нужно добиваться равенства отрезков $O'А$ и $O'Б$.

Для таких расчетов удобно воспользоваться специальной линейкой, которую легко изготовить собственными силами. Такая линейка (фиг. 20) позволяет легко определить нагрузку, соответствующую заданному значению второй гармоники. Пользование подобной линейкой основано на следующем принципе: появление второй гармоники, как уже указывалось, характеризуется тем, что амплитуды положительного и отрицательного полупериодов анодного тока становятся неравными, или, что то же, нарушается равенство отрезков $O'А$ и $O'Б$. Если считать допустимым,

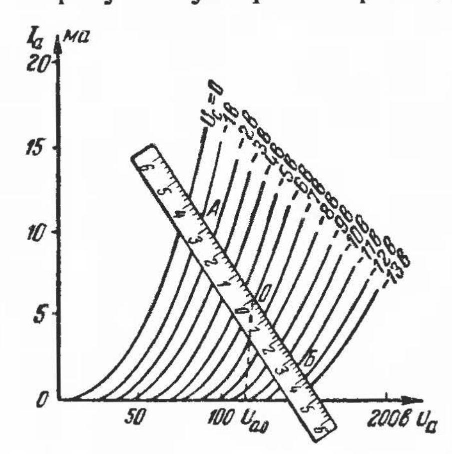
---

* На практике величина R_a выбирается часто больше $2R_i$ (примерно 3 R_i); при таком значении анодной нагрузки выходная мощность оказывается несколько меньше, но одновременно с этим во многих случаях существенно уменьшаются и нелинейные искажения.

чтобы вторая гармоника достигала 5%, т. е. чтобы коэффициент нелинейных искажений был равен 5%, то из выражения (10) следует, что в этом случае

$$\frac{O'A - O'Б}{2(O'A + O'Б)} = 0{,}05 \quad \text{или} \quad \frac{O'A}{O'Б} = \frac{11}{9}.$$

Исходя из этих соображений, производят такое построение: на линейке с нулем посередине откладывают в одну сторону от нуля равномерные деления в каком-либо масштабе (например, в миллиметрах), а в другую сторону от нуля откладывают также равномерные деления, но в масштабе, равном $^9/_{11}$ от первого. Затем нуль линейки совмещают с выбранной исходной рабочей точкой на семействе анодных характеристик, соответствующей заданному напряжению смещения U_{c0} и анодному напряжению U_{a0} и вращают линейку вокруг этой точки до тех пор, пока одинаково занумерованные деления обеих шкал не совпадут, с одной стороны, с характеристикой, соответствующей амплитуде положительного напряжения на сетке, а с другой,—с характеристикой, соответствующей амплитуде отрицательного напряжения на ней.



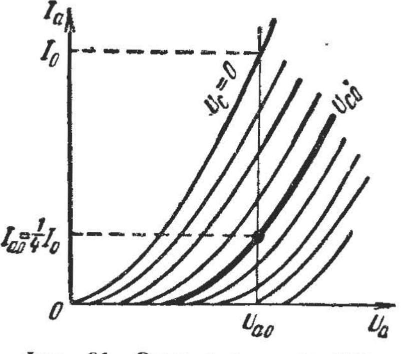
Фиг. 20. Линейка для расчета нелинейных искажений.

Например, при $U_{a0} = 120$ *в*, $U_{c0} = -6$ *в* и $U_m = 5$ *в* (фиг. 20) нуль линейки должен быть совмещен с точкой 0, а одинаковые деления должны совпадать, с одной стороны, с характеристикой, соответствующей $U_c = -1$ *в*, а с другой с $U_c = -11$ *в*. Наклон прямой, соединяющей точки пересечения линейки с этими характеристиками, будет определять собой нагрузку, при которой содержание второй гармоники в анодном токе составит 5% от тока основной частоты. Для случая, приведенного на фиг. 20, величина сопротивления нагрузки, определяемая, как отношение

отрезка, отсекаемого линейкой на горизонтальной оси (150*в*), к отрезку, отсекаемому на вертикальной оси (21,5 *ма*), составляет 7 000 *ом*.

Большие деления линейки должны итти вверх, меньшие — вниз от точки *O*. Наибольшая мощность будет получена при наибольшем допустимом значении амплитуды переменного напряжения на сетке лампы, т. е. когда одинаковые деления линейки совпадут, с одной стороны, с характеристикой для $U_c = 0$, а с другой — с характеристикой для $U_c = 2U_{c0}$. Величина выходной мощности, которая получится при этом, подсчитывается по формуле (7).

Подобным же образом можно построить линейки для $K = 3\%$, 10% и т. д. Соотношение масштабов делений подсчитывается, исходя из той же формулы (10).



Фиг. 21. Определение величины начального тока.

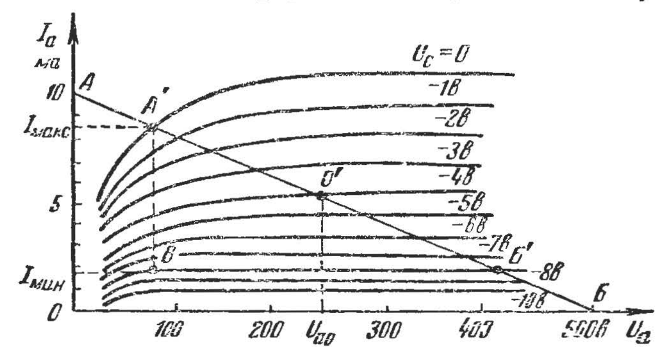
При первоначальных подсчетах исходную рабочую точку для триода можно ориентировочно определить так: начальное смещение на сетке должно соответствовать анодному току $I_{a0} = {}^1/_4\, I_0$, где I_0 — ток, соответствующий точке пересечения характеристики для $U_c = 0$ с перпендикуляром, восстановленным к горизонтальной оси в точке, определяемой требуемым анодным напряжением U_{a0} (фиг. 21).

Следует, однако, всегда помнить, что мощность, рассеиваемая на аноде лампы $P_a = U_{a0} \cdot I_0$ не должна превосходить значения, указанного в паспорте лампы, так как в противном случае лампа может выйти из строя из-за перегрева анода. Поэтому, если начальный рабочий ток, выбранный указанным выше способом, получается больше того значения, которое допустимо в отношении мощности рассеяния на аноде, нужно выбрать большее напряжение смещения на сетке и этим уменьшить I_0 до допустимой величины.

Расчет выходной ступени на пентодах или лучевых тетродах производится аналогичным же образом.

Типичная форма семейства анодных характеристик пентода приведена на фиг. 22. Внутреннее сопротивление

лампы, для которой сняты эти характеристики, весьма велико — это следует из того, что характеристики идут почти горизонтально, т. е. анодный ток мало изменяется при изменении напряжения на аноде. Поэтому для таких ламп сопротивление нагрузки R_a оказывается обычно значительно меньше их внутреннего сопротивления R_i. Зна-



Фиг. 22. Семейство анодных характеристик пентода.

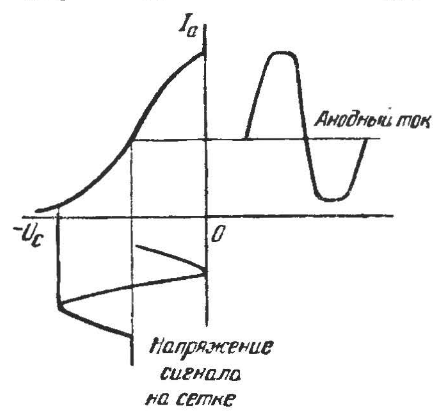
чение сопротивления нагрузки для пентодов, рекомендуемое в заводском паспорте лампы, обычно составляет около $^1/_{10}$ величины ее внутреннего сопротивления.

Обратимся теперь к семейству характеристик, приведенному на фиг. 22. Полезным участком каждой характеристики является та ее часть, которая располагается вправо от „колена" или сгиба кривой и идет более или менее прямолинейно. В той области характеристик, где анодный ток начинает резко спадать при уменьшении анодного напряжения, выходная лампа не может нормально работать, так как это привело бы к возникновению очень больших нелинейных искажений.

Нелинейные искажения у пентодов (или лучевых тетродов) имеют несколько иной характер, чем у триодов. Для установления основных различий в этом вопросе между триодами и пентодами надо провести нагрузочную прямую для пентода и рассмотреть, какой характер будут при этом иметь нелинейные искажения.

На фиг. 22 нагрузочная прямая *АБ*, проведенная через исходную рабочую точку *O'*, соответствует $R_a = 50\,000$ *ом* Начальное сеточное смещение $U_{c0} = -4$ *в*. При этих условиях амплитуда подводимого к сетке лампы напряжения, при которой еще не будет появляться ток сетки, должна

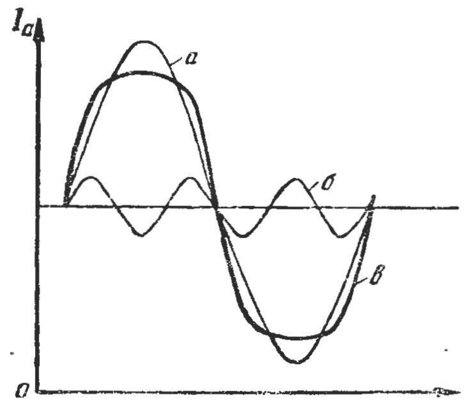
также составлять не более 4 *в*. При подаче такого напряжения на сетку лампы мы получим изменение потенциала сетки от 0 до $2U_{c0}$ (т. е. до—8 *в*), а изменение анодного тока от $I_{макс}$ до $I_{мин}$. Если мы теперь измерим амплитуду положительного и отрицательного полупериодов анодного тока, то заметим, что они будут неодинаковы. Это будет свидетельствовать об изменении формы синусоидального колебания, т. е. о появлении нелинейных искажений. Но в отличие от случая, рассмотренного для триода, здесь искажается форма уже не одной полуволны (полупериода), а обеих полуволн переменного тока. Действительно, для того, чтобы искажений не было, нужно, чтобы расстояния между соседними характеристиками были одинаковы и чтобы характеристики располагались равномерно. Тогда и точки пересечения нагрузочной линии с характеристиками будут располагаться равномерно. Но у пентода при крайних значениях напряжения на сетке характеристики как бы сжимаются, а это значит, что синусоидальное колебание исказится и синусоида как бы сплющится сверху и снизу.



Фиг. 23. Динамическая характеристика пентода.

Динамическую характеристику для пентода можно построить так же, как и для триода (см. стр. 32). Результат такого построения, произведенного по семейству характеристик фиг. 22, приведен на фиг. 23. В отличие от динамической характеристики триода (фиг. 18) здесь мы видим искривление, т. е. нелинейность характеристики, не только в ее нижней части при малом анодном токе, но и в верхней части при большом анодном токе. Кривая, приведенная на фиг. 23, показывает, как будет искажена синусоидальная форма колебания, подведенного к сетке при такой форме динамической характеристики; синусоида сплющивается сверху и снизу, оставаясь симметричной, если исходная рабочая точка находится в середине динамической характеристики.

Анализ показывает, что такая симметричная форма кривой соответствует появлению третьей гармоники. График, приведенный на фиг. 24, поясняет, как происходит сплющивание синусоиды при появлении третьей гармоники. В анодном токе у пентода могут содержаться одновременно и вторая и третья гармоника, и гармоники более высокого порядка. Если амплитуды положительного и отрицательного полупериодов почти равны и синусоида искажена симметрично, как показано на фиг. 23, то в искажениях преобладает третья и другие нечетные гармоники; если же искажение кривой имеет такой же характер (т. е. сплющивание вершин), но при этом амплитуды положительного и отрицательного полупериодов существенно отличаются друг от друга, то это свидетельствует о наличии также второй и других четных гармоник.



Фиг. 24. Искажение синусоидального колебания вследствие появления третьей гармоники.

а — синусоида основной частоты; *б* — третья гармоника; *в* — сумма основного колебания с третьей гармоникой.

Чтобы уменьшить содержание третьей гармоники, нужно выбрать нагрузочное сопротивление и начальное смещение такой величины, чтобы не заходить в область, где характеристики сильно сходятся (т. е. при очень низком напряжении на аноде, с одной стороны, и при очень большом отрицательном смещении, с другой стороны). Все изложенные выше соображения остаются в полной силе и применительно к тетродам лучевого типа, применяемым в выходных ступенях радиоприемников.

Содержание третьей гармоники можно определить по приводимой ниже формуле:

$$K_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2ВГ - (O'А + O'Б)}{O'А + O'Б + ВГ} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2в - (а + б)}{а + б + в}. \quad (11)$$

Значения всех величин, входящих в эту формулу, ясны из фиг. 25. Отрезки $O'В$ и $O'Г$, составляющие в сумме $ВГ$,

определяются точками пересечения нагрузочной линии с характеристиками, соответствующими сеточному смещению $U_{c3}={}^1/_2U_{c0}$ и $U_{c4}={}^3/_2U_{c0}$.

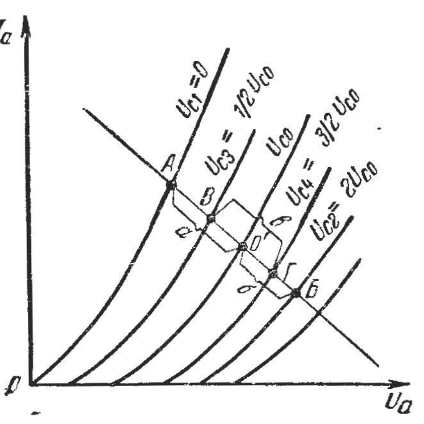
Содержание второй гармоники по характеристикам фиг. 25 будет выражаться как

$$K_2=\frac{1}{2}\cdot\frac{O'A-O'Б}{O'A+O'Б}=\frac{1}{2}\cdot\frac{a-б}{a+б}. \qquad (12)$$

Полный коэффициент нелинейных искажений, учитывающий влияние как второй, так и третьей гармоники, будет в этом случае

$$K=\sqrt{K_2^2+K_3^2}. \qquad (13)$$

Выбор режима выходной ступени на пентоде или лучевом тетроде сводится в основном к выбору начальной рабочей точки и величины сопротивления нагрузки, которое должно быть оптимальным с точки зрения нелинейных искажений. Как уже указывалось, для пентодов и тетродов наивыгоднейшее сопротивление нагрузки R_a оказывается обычно много меньшим внутреннего сопротивления R_i. Большое внутреннее сопротивление этих ламп приводит к двум особенностям расчета выходного трансформатора, а именно:



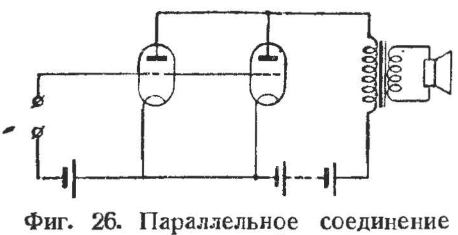
Фиг. 25. Графическое определение коэффициента нелинейных искажений.

1) первичную обмотку приходится делать с большой индуктивностью, чтобы улучшить воспроизведение низких частот:

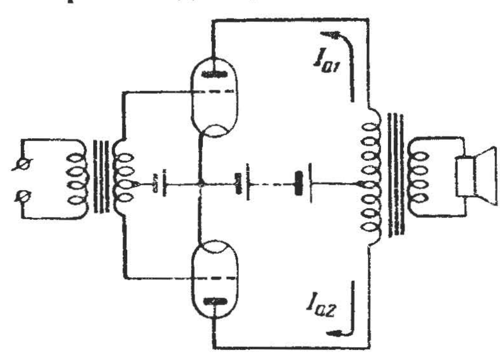
2) индуктивность рассеяния практически не имеет значения, так как допустимая ее величина оказывается весьма большой; поэтому хорошее пропускание высоких частот может быть получено практически с любым трансформатором.

ДВУХТАКТНАЯ ВЫХОДНАЯ СТУПЕНЬ

Для увеличения мощности, отдаваемой выходной ступенью, работающей на лампах данного типа, можно пользоваться разными способами. Простейший способ заключается в применении в выходной ступени двух ламп, включенных параллельно (фиг. 26). В этом случае полезная мощность, отдаваемая усилителем, увеличивается вдвое. Но схемы такого рода не относятся к числу лучших. Одним из существенных недостатков подобных схем является то, что ток покоя, протекающий через первичную обмотку выходного трансформатора и создающий постоянный магнитный поток, при двух лампах возрастает вдвое. Это усложняет условия работы выходного трансформатора. Чтобы избежать насыщения сердечника, приходится увеличивать его размеры (сечение), а следовательно, делать более громоздкий и дорогой трансформатор. Поэтому способ увеличения выходной мощности путем параллельного соединения ламп применяется редко.



Фиг. 26. Параллельное соединение ламп в выходной ступени.



Фиг. 27. Двухтактная схема.

Значительно более выгодно собирать выходную ступень по так называемой двухтактной схеме (фиг. 27). В этом случае аноды ламп соединяются с противоположными концами первичной обмотки трансформатора, а напряжение к ним подводится через среднюю точку этой обмотки. Таким образом, токи I_{a1} и I_{a2} проходят к анодам обеих ламп через половины первичной обмотки трансформатора в противоположных направлениях, а следовательно, и магнитные потоки, создаваемые ими, оказываются взаимно противоположными и действующими навстречу друг другу.

Если обе лампы по своим параметрам совершенно одинаковы, то при отсутствии переменных напряжений на их сетках анодные токи обеих ламп (токи покоя) по величине будут тоже одинаковы. Следовательно, они будут создавать и одинаковые магнитные потоки, направленные навстречу друг другу. В результате этого суммарный магнитный поток в трансформаторе будет равен нулю.

Из всего сказанного вытекает первый существенный вывод: в выходном трансформаторе двухтактной схемы отсутствует постоянное подмагничивание, а следовательно, отпадает основная неприятность, сопутствующая параллельному соединению ламп.

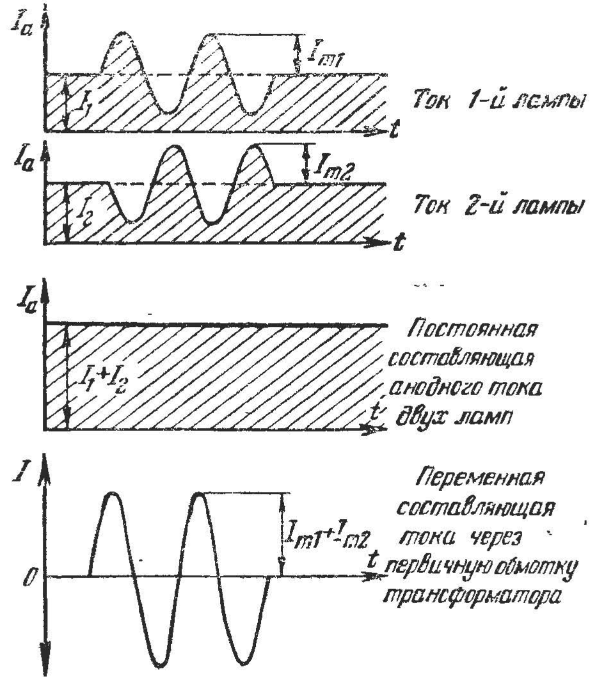
Сердечник трансформатора для двухтактной выходной ступени может быть значительно меньших размеров (меньшего сечения), чем для однотактной ступени.

Принцип работы двухтактной схемы заключается в следующем: усиливаемое напряжение подается на сетки обеих ламп в противоположных фазах. Это приводит к тому, что переменные составляющие анодных токов ламп оказываются отличающимися по фазе на 180°, т. е. в моменты, когда анодный ток одной лампы увеличивается, ток второй лампы уменьшается (фиг. 28), причем, если лампы в обоих плечах одинаковые, то увеличение тока в одном плече сопровождается точно таким же уменьшением тока во втором плече. Но вследствие указанных ранее причин, т. е. взаимно-противоположных воздействий токов обеих ламп на магнитный поток, уменьшение тока через вторую лампу действует на магнитный поток совершенно так же, как увеличение тока через первую лампу. Поэтому изменения переменного магнитного потока в сердечнике будут происходить под суммарным действием переменных составляющих токов обеих ламп. Амплитуда магнитного потока будет пропорциональна удвоенной амплитуде анодного тока каждой из ламп.

Отсюда вытекает второе следствие: напряжение во вторичной обмотке выходного трансформатора двухтактной схемы, пропорциональное переменному магнитному потоку в сердечнике, будет пропорционально удвоенной амплитуде анодного тока одной из ламп.

Если каждая из ламп, используемых в двухтактной схеме, дает полезную мощность $P_{вых}$, то общая мощность ступени будет в два раза больше, т. е. будет равна $2P_{вых}$.

Выгоды соединения ламп по двухтактной схеме заключаются, следовательно, в том, что в отношении полезной выходной мощности действия обеих ламп суммируются, а в отношении вредного явления в виде постоянного подмаг-



Фиг. 28. Токи в анодных цепях двухтактной схемы.

ничивания сердечника трансформатора действия обеих ламп взаимно компенсируются.

Кроме того, двухтактная схема обладает рядом дополнительных преимуществ. Наиболее существенны из них следующие:

1. Вследствие указанных выше соотношений между токами в обоих плечах двухтактной ступени значение суммарного тока, потребляемого от батареи (или другого источника питания), остается все время постоянным.

2. Анализ показывает, что в двухтактных схемах при полной симметрии обоих плеч отсутствуют четные гармоники. Это значит, что при использовании двухтактной схемы наблюдаются меньшие нелинейные искажения, чем при однотактной схеме.

Если оба плеча схемы не вполне симметричны, то появятся четные гармоники, но по своей величине они будут незначительны.

3. Пульсации питающих напряжений значительно меньше сказываются на работе двухтактных схем. Это объясняется тем, что пульсации выпрямленного напряжения в отличие от усиливаемых колебаний попадают на аноды и на сетки ламп обоих плеч в одинаковой фазе. Поэтому одновременное увеличение или уменьшение анодного тока в обоих плечах под действием таких пульсаций не вызывает изменений магнитного потока в сердечнике трансформатора, а следовательно, не вызывает и фона во вторичной его обмотке (изменения магнитного потока, создаваемые каждой из ламп, взаимно компенсируются).

Кроме того, важным достоинством двухтактных схем является еще то, что они позволяют устанавливать для ламп особые режимы работы, в условиях которых начальный анодный ток (ток покоя) или совершенно не протекает через лампы, или же он оказывается незначительным. Применением таких режимов достигается экономия в расходе энергии анодной батареи. К таким режимам относятся режимы класса АВ и класса В.

Вообще для ламп выходных ступеней применяется несколько рабочих режимов. Основные из них следующие:

1) режим класса А, когда исходная рабочая точка выбирается на середине прямолинейного участка характеристики лампы (фиг. 29,*а*);

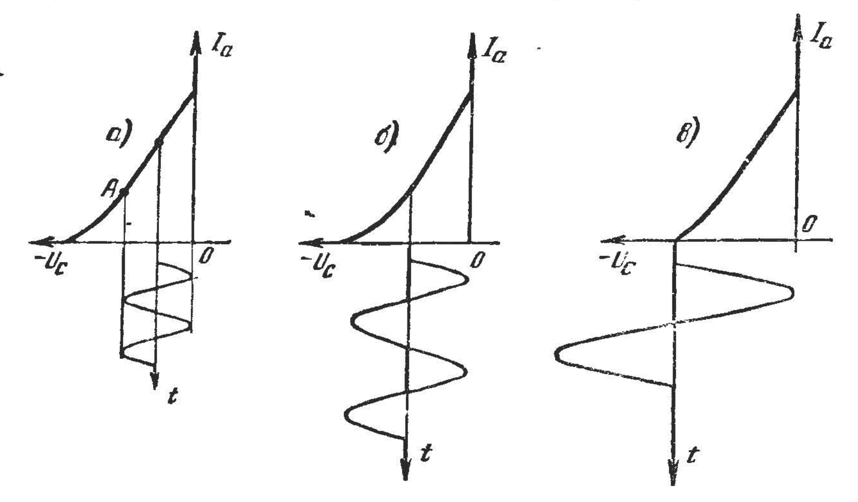
2) режим класса АВ, когда исходная рабочая точка находится ниже середины прямолинейного участка и ближе к нижнему сгибу характеристики (фиг. 29,*б*);

3) режим класса В когда исходная рабочая точка располагается у самого начала характеристики, т. е. начальный анодный ток лампы (ток покоя) равен нулю (фиг. 29,*в*).

Однотактная выходная ступень может работать лишь в режиме класса А. В этом случае для получения неискаженного усиления нужно подводить к сетке лампы такой величины переменные напряжения, при которых колебания анодного тока лампы происходили бы только в пределах прямолинейного участка сеточной характеристики, т. е. чтобы при отрицательной амплитуде напряжения на сетке, наименьшее значение анодного тока в лампе не падало ниже точки *А* на характеристике (фиг. 29,*а*).

Если подводимое к сетке напряжение превысит указанные пределы, появятся нелинейные искажения вследствие того, что лампой будут неодинаково усиливаться положительные и отрицательные полупериоды подводимого к сетке напряжения.

Коэффициент полезного действия лампы, работающей в режиме класса А, невелик, так как при отсутствии сигнала



Фиг. 29. Классы усиления.

на сетке в анодной цепи лампы расходуется значительная мощность, потому что в эти моменты через лампу протекает значительный ток покоя.

Режимы класса АВ и класса В, как уже говорилось, являются более экономичными, потому что мощность, потребляемая в анодной цепи ламп, в моменты отсутствия сигнала на сетке бывает мала или даже равна нулю. Но эти режимы, как уже упоминалось, применимы только в двухтактных схемах выходной ступени. При однотактной схеме усиление при работе лампы в таких режимах сопровождалось бы недопустимо большими искажениями. Объясняется это тем, что усиление происходило бы «с отсечкой», т. е. первая полуволна подводимого колебания усиливалась бы значительно больше, чем вторая.

Иначе происходит дело в двухтактной схеме. В этом случае при режимах классов АВ и В искажений не получается потому, что оба полупериода подводимого колебания

усиливаются одинаково, но один полупериод усиливается одной лампой (в это время вторая лампа почти или совсем не работает), а второй полупериод усиливается второй лампой (в это время не работает первая лампа).

Расчет двухтактного усилителя, работающего в режиме класса А, производится для одной лампы по методу, аналогичному расчету однотактной ступени; полученный результат затем удваивается и таким путем определяется значение общей мощности, отдаваемой ступенью с двумя лампами.

Искажения для усилителя по двухтактной схеме класса А подсчитываются для одной лампы по формулам, учитывающим появление нечетных гармоник, поскольку, как указано, выше, четные гармоники в этом случае отсутствуют. Для практических целей достаточным оказывается подсчет содержания третьей гармоники, так как гармоники высших порядков бывают обычно выражены значительно слабее и ими можно без особой погрешности пренебречь.

Подсчет может быть произведен по формуле (11).

В случае, если в усилителе нет полной симметрии между обоими плечами, искажения будут больше, так как появится и вторая гармоника.

При выборе сопротивления нагрузки для двухтактного усилителя на пентодах или тетродах нет надобности исходить из такого расчета, чтобы амплитуды токов обоих полупериодов усиливаемого напряжения были одинаковы, т. е. чтобы вторая гармоника равнялась нулю. Это условие отпадает, поскольку четные гармоники в схеме устраняются сами собой. Поэтому при выборе сопротивления нагрузки целесообразно исходить из условий, обеспечивающих возможность получения максимальной выходной мощности.

Если мы обратимся к анодным характеристикам пентода (фиг. 22), то можно заметить, что для этого существует простой путь. Выбрав значение начального смещения U_{c0} и величину анодного напряжения U_{a0}, проводим через исходную рабочую точку O' нагрузочную линию $AБ$ и вращаем ее вокруг точки O', так, чтобы получить наибольшую площадь треугольника A' $Б'$ B'. Такое положение булет в то же время соответствовать и условию максимальной выходной мощности (которая для двух ламп будет выражаться половиной площади этого треугольника). Сопротивление нагрузки будет определяться наклоном нагрузочной линии, как это описано выше на стр. 27, но при

расчете выходного трансформатора следует удваивать полученное таким образом значение нагрузочного сопротивления, поскольку нагрузка в двухтактной схеме действует между анодами двух ламп.

Особую категорию составляют двухтактные усилители, работающие в режиме, допускающем наличие токов сетки.

При таком режиме на сетку лампы подается сигнал, амплитуда которого превышает величину начального сеточного смещения; поэтому в течение части периода в цепи сетки выходной лампы течет ток. Для уточнения режима работы выходной ступени иногда пользуются такими обозначениями: режим классов AB_1 и B_1 — при отсутствии тока сетки; режимы класса AB_2 или B_2—при наличии тока сетки.

Режимы классов B_2 и AB_2 дают возможность наиболее эффективного использования ламп. Однако это связано с некоторым дополнительным осложнением, так как наличие тока в цепи сетки выходной лампы вносит резкие изменения в условия работы лампы предварительной ступени усиления, предшествующей выходной ступени. Эту ступень усиления нередко называют предоконечной. В усилителях классов B_2 и AB_2 предоконечная ступень должна давать не только напряжение, необходимое для «раскачки» лампы выходной ступени, но и мощность, необходимую для питания цепей сеток ламп этой ступени.

В отношении расчета усилителей классов AB и B мы ограничимся лишь приведенными краткими замечаниями, так как вопрос этот отличается значительной сложностью и может быть подробно освещен лишь в отдельной брошюре.

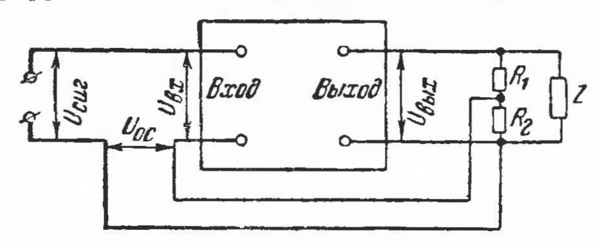
При конструировании усилителя, работающего в режиме классов B или AB, можно рекомендовать пользоваться типовыми заводскими данными, приводимыми в паспортах ламп, предназначенных для этой цели, и не допускать существенных отклонений от них.

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Качественные показатели выходной ступени, даже в случае, если она правильно рассчитана в отношении оптимального использования выходной лампы, могут быть повышены за счет введения в схему отрицательной обратной связи, так как последняя способствует уменьшению вредного действия всех видов рассмотренных ранее искажений.

Сущность самого принципа использования отрицательной обратной связи заключается в том, что некоторая часть усиленного напряжения из анодной цепи лампы подается обратно на ее вход, т. е. в цепь сетки лампы. При этом фаза подаваемого напряжения должна быть противоположна по знаку напряжению сигнала на сетке лампы. Иначе говоря, напряжение обратной связи всегда действует навстречу напряжению сигнала, т. е. по абсолютной величине вычитается из него.

Принцип получения отрицательной обратной связи иллюстрируется схемой, приведенной на фиг. 30. Часть



Фиг. 30. Отрицательная обратная связь по напряжению.

выходного напряжения, обозначенная $U_{ос}$, подается обратно в сеточную цепь ламп и включается последовательно с входным напряжением сигнала $U_{сиг}$. Таким образом, на сетке лампы всегда будет действовать сумма двух напряжений $U_{вх} = U_{сиг} + U_{ос}$. Так как эти напряжения всегда противоположны по фазе, то результатом действия обратной связи будет уменьшение напряжения сигнала на сетке лампы и, следовательно, усиление ступени как бы уменьшится.

Легко заметить, что чем больше будет выходное напряжение $U_{вых}$, тем большее противодействующее напряжение обратной связи $U_{ос}$ будет поступать обратно на вход усилителя, и, следовательно, тем в большей степени будет уменьшаться усиление. И, наоборот, при уменьшении напряжения $U_{вых}$ уменьшится и напряжение обратной связи на входе лампы. Это приведет к возрастанию усиления ступени. Иначе говоря, отрицательная обратная связь стремится поддерживать напряжение на выходе ступени постоянным, автоматически уменьшая или увеличивая усиление при изменениях выходного напряжения.

Следствием этого, между прочим, является то, что усилители с отрицательной обратной связью обеспечивают более устойчивое усиление при колебаниях питающих напряжений и при смене ламп, чем усилители без такой обратной связи.

Но особенно важно то, что использование описанной зависимости между выходным и входным напряжениями дает весьма существенные результаты в отношении уменьшения как частотных, так и нелинейных искажений.

Рассмотрим, как отразится действие отрицательной обратной связи на частотной характеристике усилителя. Реальная частотная характеристика усилителя без обратной связи имеет вид, показанный на фиг. 7,*б*. Из этой характеристики видно, что усиление падает в области высших и низших частот звукового диапазона. При наличии отрицательной обратной связи картина изменится; общее усиление, как следует из самого принципа действия отрицательной обратной связи, конечно, уменьшится, но это уменьшение будет различным на разных частотах. В полосе тех частот, где наблюдается спадание частотной характеристики, будет получаться меньшее выходное напряжение, а это повлечет за собой одновременно и уменьшение напряжения, подаваемого обратно на вход, т. е. на сетку лампы. Следовательно, на этих частотах будет наблюдаться меньшее снижение усиления, вызываемое действием отрицательной обратной связи. В результате этого и общее усиление ступени в этой области частот понизится в меньшей степени и частотная характеристика несколько выравняется.

Чем сильнее обратная связь, тем более равномерным будет усиление на разных частотах и тем в большей мере будет выравниваться частотная характеристика.

Таким образом, применение отрицательной обратной связи приводит к снижению частотных искажений.

Рассмотрим теперь, как будет влиять отрицательная обратная связь на нелинейные искажения. Как указывалось ранее (стр. 16), нелинейные искажения выражаются в том, что на выходе ступени появляются гармоники, которых не было в составе сигнала, подводимого к сетке лампы. При подаче отрицательной обратной связи из анодной цепи на сетку лампы поступает как напряжение основной усиливаемой частоты, так и напряжение ее гармоник, появившихся в процессе усиления. Действие напряжения основной частоты, как уже отмечалось, приведет к некоторому уменьшению усиле-

ния на этой частоте, а действие напряжения гармоник, попадающего на сетку в противоположной фазе, будет таково, что вызовет уменьшение напряжения этих гармоник на выходе ступени. Чтобы уменьшившаяся под действием отрицательной обратной связи полезная мощность на выходе оставалась достаточно большой, нужно увеличить напряжение сигнала, подводимого от предыдущей ступени. Тогда применение отрицательной обратной связи приведет к уменьшению содержания гармоник в выходном напряжении и позволит сохранить заданную величину выходной мощности.

Итак, применение отрицательной обратной связи позволяет уменьшить как частотные, так и нелинейные искажения в выходной ступени, но одновременно несколько снижает усиление. Последнее обстоятельство и является основным недостатком действия отрицательной обратной связи. С этим недостатком можно сравнительно легко справиться, повысив несколько усиление, даваемое предварительным усилителем приемника, до выходной ступени.

Как уже отмечалось, действие отрицательной обратной связи зависит от ее величины, т. е. от того, какая часть переменного напряжения с выхода усилителя попадает обратно на его вход. Для математического выражения этой зависимости введем следующие обозначения:

β — число, показывающее, какую часть выходного напряжения составляет напряжение отрицательной обратной связи, подаваемое на вход усилительной ступени, т. е.

$$\beta = \frac{U_{oc}}{U_{вых}};$$

M — усиление ступени без отрицательной обратной связи;
M' — усиление ступени при наличии отрицательной обратной связи;
K — коэффициент нелинейных искажений без отрицательной обратной связи.
K' — коэффициент нелинейных искажений при наличии отрицательной обратной связи.

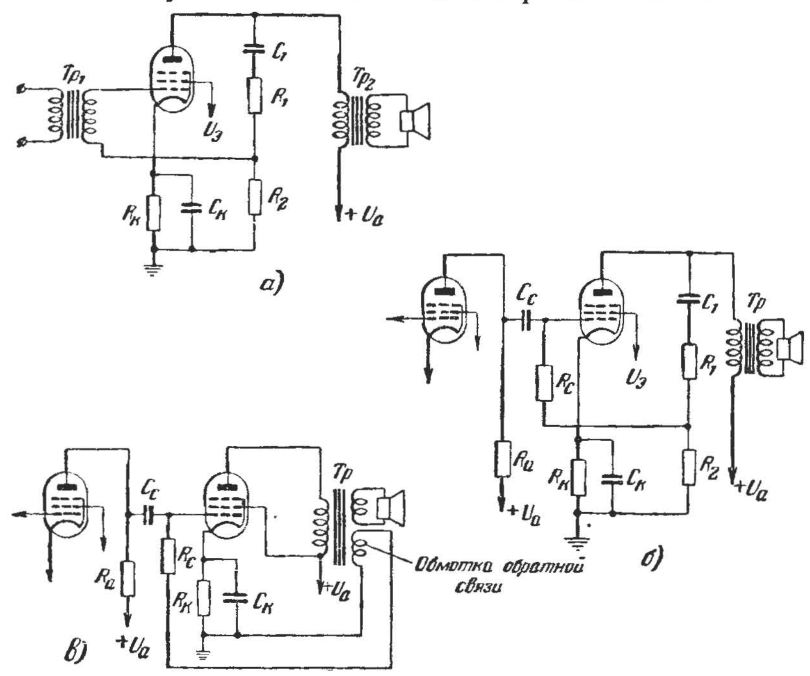
Влияние отрицательной обратной связи на величину усиления ступени и нелинейных искажений определяется так:

$$M' = \frac{M}{1+\beta M} \text{ и } K' = \frac{K}{1+\beta M},$$

т. е. как усиление ступени, так и коэффициент нелинейных искажений уменьшаются в $(1+\beta M)$ раз. Величину $(1+\beta M)$ называют фактором обратной связи.

Обычно β выбирают такой величины, чтобы фактор обратной связи имел значение порядка 3—4. Очевидно, для соблюдения этого условия величина β должна быть различной для разных случаев практики, в зависимости от величины усиления выходной ступени *M*. Практически значение β обычно лежит в пределах от 0,05 до 0,2 (от 5 до 20%).

На фиг. 31 приведены некоторые простейшие схемы выходной ступени с отрицательной обратной связью.



Фиг. 31. Схемы с отрицательной обратной связью по напряжению.

В схеме фиг. 31,*а* напряжение отрицательной обратной связи вводится в цепь сетки лампы последовательно с напряжением сигнала, возникающим во вторичной обмотке входного трансформатора $Тр_1$. Величина β для этого случая определяется так:

$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

(принимая при этом, что конденсатор C_1 обладает достаточно большой емкостью и поэтому можно пренебречь падением напряжения на нем).

Для случая, когда предыдущая ступень работает по схеме реостатного усиления, может быть использована схема фиг. 31,*б*. Если лампа предварительного усилителя обладает при этом большим внутренним сопротивлением, то приближенно величина β может быть выражена так:

$$\beta \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_a}{R_a + R_c}.$$

Схема фиг. 31,*в* показывает, как напряжение обратной связи, вводимое в цепь сетки, может быть получено с помощью специальной обмотки на выходном трансформаторе. Величина β для этой схемы будет:

$$\beta = w_2/w_1,$$

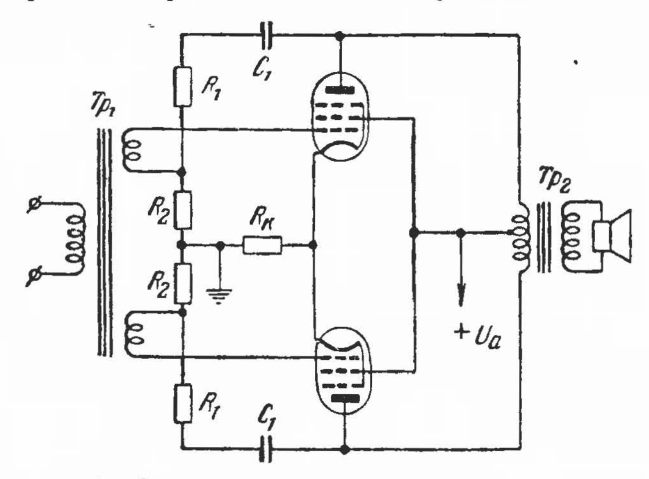
где w_2 и w_1 — количество витков соответственно в обмотке обратной связи и в первичной обмотке выходного трансформатора.

Для того чтобы напряжение обратной связи подавалось в нужной для нормальной работы схемы фазе (т. е. было обратно по знаку напряжению сигнала), надо правильно включить концы обмотки обратной связи. Это обычно определяется опытным путем: при правильном включении концов обмотки усиление должно понизиться.

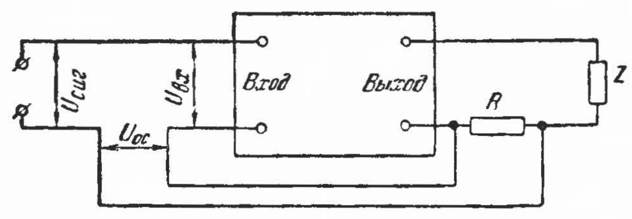
Существует много вариантов схем выходной ступени с отрицательной обратной связью. Находят также применение схемы с отрицательной обратной связью, охватывающей две ступени усиления. В этом случае переменное напряжение с выхода усилителя подается на сетку не выходной лампы, а лампы предыдущей усилительной ступени. Такие схемы применяются в тех случаях, когда желательно уменьшить искажения не только в выходной, но и в предшествующей ступени усилителя. Это, в частности, бывает целесообразно применять в тех случаях, когда выходная ступень работает в режиме, допускающем наличие тока в цепи сетки лампы.

Отрицательная обратная связь может быть использована, кроме того, и для корректирования частотной характеристики усилителя, если величину β сделать различной для разных частот. Простейшим примером могут служить те же схемы фиг. 31,*а* и *б* с небольшими добавлениями. Если в этих схемах параллельно сопротивлению R_2 подключить конденсатор, то величина β для высших звуковых частот будет меньше, чем для низших. Следовательно, усиление на

высших частотах при этом будет больше и на частотной характеристике появится подъем в области высоких частот. Если конденсатор подключить параллельно сопротивлению R_1, то получится обратная картина: величина β окажется меньше для низших частот и поэтому подъем частотной характеристики будет иметь место у ее низкочастотного



Фиг. 32. Схема двухтактной ступени с отрицательной обратной связью по напряжению.



Фиг. 33. Отрицательная обратная связь по току.

конца. Эта возможность часто используется в приемниках как для автоматической, так и для ручной регулировки тембра.

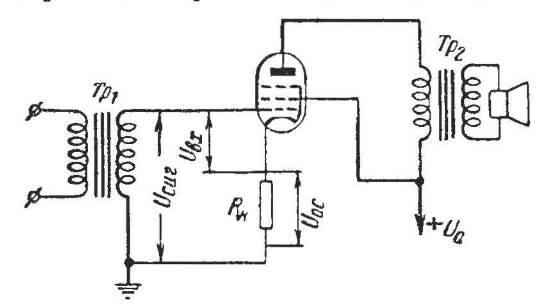
Отрицательная обратная связь может быть применена и в двухтактной выходной ступени. Примером подобной схемы может служить фиг. 32. Как и для схемы фиг. 31,*а*, в данном случае величина

$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Рассмотренные выше схемы относятся к числу так называемых схем с отрицательной обратной связью по напряжению, поскольку величина обратной связи в этих случаях пропорциональна напряжению на выходе усилительной ступени. Другим видом этой связи является так называемая обратная связь по току. При этом варианте величина отрицательной обратной связи пропорциональна переменному току на выходе усилителя (фиг. 33). В этом случае

$$\beta = \frac{R}{R_1 + Z}.$$

В отношении нелинейных искажений схемы обратной связи по току и по напряжению равноценны, но в отноше-



Фиг. 34. Схема с отрицательной обратной связью по току.

нии частотных искажений обратная связь по току ведет себя иначе и приводит не к уменьшению, а, наоборот, к увеличению частотных искажений, которые имеют место в усилителе вследствие изменения сопротивления нагрузки Z на разных частотах. Это и является одной из основных причин, по которым обратная связь по току применяется редко.

Простейшая схема отрицательной связи по току приведена на фиг. 34, где обратная связь достигается за счет отсутствия емкости, шунтирующей катодное сопротивление $R_к$ выходной лампы.

ТИПОВЫЕ РЕЖИМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАМП ДЛЯ ВЫХОДНЫХ СТУПЕНЕЙ РАДИОПРИЕМНИКОВ

Ниже приводятся данные для типовых режимов использования наиболее употребительных ламп, работающих в выходных ступенях радиовещательных приемников. Приводи-

мые цифры дают наиболее близкие значения соответствующих величин (токов и параметров ламп).

В случае, когда типовой режим не удовлетворяет каким-либо требованиям конструктора, расчет выходной ступени может быть произведен по характеристикам ламп в соответствии с указаниями, приведенными в настоящей брошюре.

1. Лампа 6Ф6 (пентод, подогревный)

Накал: напряжение	6,3 *в*
ток	0,7 *а*

Однотактная схема, режим класса А (одна лампа)

Напряжение на аноде	250 *в*
Напряжение на экранирующей сетке	250 „
Напряжение смещения на управляющей сетке	—16,5 „
Анодный ток	34 *ма*
Ток экранирующей сетки	7 „
Крутизна характеристики	2,5 *ма/в*
Внутреннее сопротивление	78 000 *ом*
Амплитуда сигнала на сетке	16,5 *в*
Сопротивление анодной нагрузки	7 000 *ом*
Полезная выходная мощность	3 *вт*

Двухтактная схема, режим класса А (две лампы)

Напряжение на аноде	315 *в*
Напряжение на экранирующей сетке	285 „
Напряжение смещения на управляющей сетке	—24 „
Анодный ток (двух ламп)	65 *ма*
Ток экранирующих сеток (для двух ламп)	12 *ма*
Амплитуда сигнала между сетками двух ламп	48 *в*
Пересчитанное сопротивление нагрузки между анодами	10 000 *ом*
Выходная мощность	11 *вт*

Двухтактная схема, режим класса AB_2 (две лампы)

Напряжение на аноде	375 *в*
Напряжение на экранирующей сетке	250 „
Напряжение смещения на управляющей сетке	— 26 „
Анодный ток при отсутствии сигнала (для двух ламп)	34 *ма*
Ток экранирующих сеток (для двух ламп) при отсутствии сигнала	5 *ма*
Амплитуда сигнала между сетками	82 *в*
Пересчитанное сопротивление нагрузки между анодами	10 000 *ом*
Выходная мощность	18 *вт*

2. Лампа 6V6 (лучевой тетрод, подогревный)

Накал: напряжение	6,3 *в*
ток	0,45 *а*

Однотактная схема, режим класса А (одна лампа)

Напряжение на аноде	250	315 *в*
Напряжение на экранирующей сетке	250	225 „

Напряжение смещения на управляющей сетке . .	—12,5	—13 „
Анодный ток	45	34 *ма*
Ток экранирующей сетки	4,5	2,5 „
Крутизна характеристики	4,1	3,75 *ма/в*
Внутреннее сопротивление	52 000	77 000 *ом*
Амплитуда сигнала на сетке	12,5	13 *в*
Сопротивление анодной нагрузки	5 000	8 500 *ом*
Полезная выходная мощность	4,5	5,5 *вт*

Двухтактная схема, режим класса AB_1 (две лампы)

Напряжение на аноде	250	285 *в*
Напряжение на экранирующей сетке	250	285 „
Напряжение смещения на управляющей сетке . .	—15	—19 „
Анодный ток при отсутствии сигнала (для двух ламп)	70	70 *ма*
Ток экранирующих сеток при отсутствии сигнала (для двух ламп)	5	4 „
Амплитуда сигнала между сетками	30	38 *в*
Пересчитанное сопротивление нагрузки между анодами	10 000	8 000 *ом*
Выходная мощность	10	14 *вт*

3. Лучевой тетрод 6П3 (подогревный)

Накал: напряжение	6,3 *в*
ток	0,9 *а*

Однотактная схема, режим класса А (одна лампа)

Напряжение на аноде	250 *в*
Напряжение на экранирующей сетке	250 „
Напряжение смещения на управляющей сетке	—14 *в*
Анодный ток	78 *ма*
Ток экранирующей сетки	7 „
Крутизна характеристики	6 *ма/в*
Внутреннее сопротивление	22 500 *ом*
Амплитуда сигнала на сетке	14 *в*
Сопротивление анодной нагрузки	2 500 *ом*
Полезная выходная мощность	5,5 *вт*

Двухтактная схема, режим класса А (две лампы)

Напряжение на аноде	250 *в*
Напряжение на экранирующей сетке	250 „
Напряжение смещения на управляющей сетке	—16 „
Анодный ток (для двух ламп)	130 *ма*
Ток экранирующих сеток (для двух ламп)	12 „
Амплитуда сигнала между сетками	32 *в*
Пересчитанное сопротивление нагрузки между анодами .	5 000 *ом*
Выходная мощность	12 *вт*

4. Триод 6В4 (подогревный)

Накал: напряжение	6,3 *в*
ток	1 *а*

Однотактная схема, режим класса А (одна лампа)

Напряжение на аноде	250 *в*
Напряжение смещения на управляющей сетке	—45 "
Ток анода	60 *ма*
Крутизна характеристики	5,25 *ма/в*
Внутреннее сопротивление	800 *ом*
Сопротивление анодной нагрузки	2 500 *ом*
Выходная мощность	3,5 *вт*

Двухтактная схема, режим класса AB_I (две лампы)

Напряжение на аноде	300 *в*
Напряжение смещения на управляющей сетке	—62 "
Анодный ток при отсутствии сигнала (для двух ламп)	80 *ма*
Сопротивление анодной нагрузки между анодами	5 000 *ом*
Выходная мощность	до 15 *вт*

5. Пентод 2П1П (прямого накала)

Накал: напряжение	2,4	1,2 *в*
ток	0,06	0,12 *а*

Однотактная схема, режим класса А (одна лампа)

Напряжение на аноде	90 *в*
Напряжение на экранирующей сетке	90 "
Напряжение смещения на управляющей сетке	—4,5 "
Анодный ток	8 *ма*
Ток экранирующей сетки	1,8 "
Крутизна характеристики	2 *ма/в*
Внутреннее сопротивление	100 000 *ом*
Амплитуда сигнала на сетке	4,5 *в*
Сопротивление анодной нагрузки	10 000 *ом*
Выходная мощность	0,25 *вт*

ДАННЫЕ ВЫХОДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЗАВОДСКИХ ПРИЕМНИКОВ

Тип приемника	Выходная лампа	Сопротивление звуковой катушки динамика, *ом*	Пластины сердечника		Первичная обмотка		Вторичная обмотка	
			тип	набор, *мм*	провод	число витков	провод	число витков
Москвич	6V6	3,0	Ш-16	15	ПЭЛ 0,1	2 850	ПЭЛ 0,64	60
Рекорд-47; АРЗ-49	30П1М	3,25	Ш-16	16	ПЭ 0,12	2 000	ПЭ 0,59	87
Салют	6Ф6	3	Ш-20	25	ПЭ 0,13	4 000	ПЭ 0,6	86
Урал-49	6V6	3,8	Ш-19	20	ПЭЛ 0,15	2 613	ПЭЛ 0,8	73
Восток-49	6V6	3,4	Ш-18	20	ПЭЛ 0,12	2 800	ПЭЛ 0,64	79
Электросигнал-2	6П3	3	Ш-18	25	ПЭ 0,13	2 200	ПЭ 0,9	56
Родина	2Ж2М (2 шт.)	3	Ш-16	15	ПЭЛ 0,1	2 000×2	ПЭЛ 0,8	33
Рига Б-912	2П1П	2,3	Ш-16	16	ПЭЛ 0,12	2 360	ПЭЛ 0,6	28
Рига Т-689	6Л6	12	Ш-20	25	ПЭЛ 0,18	2 500	ПЭЛ 0,64	200